N° d'ordre

THÈSE

présentée

A L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE DE GRENOBLE

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR INGÉNIEUR

PAR

Jean-Claude LATOMBE
Ingénieur I.E.G. et I.M.A.G.

Elaboration d'un Système Pédagogique d'Assistance A la Conception en Electrotechnique

---

Soutenue le 30 Novembre 1972, devant la Commission d'Examen

Monsieur	J. KUNTZMANN	Président
Messieurs	J. C. BOUSSARD	
	E. PILLET	Examinateurs
	J. C. SABONNADIERE	
Monsieur	B. RYCKELYNCK	Invité

N° d'ordre

THÈSE

présentée

A L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE DE GRENOBLE

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR INGÉNIEUR

PAR

Jean-Claude LATOMBE
Ingénieur I.E.G. et I.M.A.G.

Elaboration d'un Système Pédagogique d'Assistance A la Conception en Electrotechnique

---

Soutenue le 30 Novembre 1972, devant la Commission d'Examen

Monsieur	J. KUNTZMANN	Président
Messieurs	J. C. BOUSSARD	
	E. PILLET	Examinateurs
	J. C. SABONNADIERE	
Monsieur	B. RYCKELYNCK	Invité

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE

LISTE DES PROFESSEURS

Président : Monsieur Michel SOUTIF
Vice-Président : Monsieur Gabriel CAU

PROFESSEURS TITULAIRES

MM.	ANGLES D'AURIAC Paul	Mécanique des fluides
	ARNAUD Georges	Clinique des maladies infectieuses
	ARNAUD Paul	Chimie
	AUBERT Guy	Physique
	AYANT Yves	Physique approfondie
Mme	BARBIER Marie-Jeanne	Electrochimie
MM.	BARBIER Jean-Claude	Physique expérimentale
	BARBIER Reynold	Géologie appliquée
	BARJON Robert	Physique nucléaire
	BARNOUD Fernand	Biosynthèse de la cellulose
	BARRA Jean-René	Statistiques
	BARRIE Joseph	Clinique chirurgicale
	BENOIT Jean	Radioélectricité
	BERNARD Alain	Mathématiques Pures
	BESSON Jean	Electrochimie
	BEZES Henri	Chirurgie générale
	BLAMBERT Maurice	Mathématiques Pures
	BOLLIET Louis	Informatique (IUT B)
	BONNET Georges	Electrotechnique
	BONNET Jean-Louis	Clinique ophtalmologique
	BONNET-EYMARD Joseph	Pathologie médicale
	BONNIER Etienne	Electrochimie Electrométallurgie
	BOUCHERLE André	Chimie et Toxicologie
	BOUCHEZ Robert	Physique nucléaire
	BOUSSARD Jean-Claude	Mathématiques Appliquées
	BRAVARD Yves	Géographie
	BRISSONNEAU Pierre	Physique du Solide
	BUYLE-BODIN Maurice	Electronique
	CABANAC Jean	Pathologie chirurgicale
	CABANEL Guy	Clinique rhumatologique et hydrologie
	CALAS François	Anatomie
	CARRAZ Gilbert	Biologie animale et pharmacodynamie
	CAU Gabriel	Médecine légale et Toxicologie
	CAUQUIS Georges	Chimie organique
	CHABAUTY Claude	Mathématiques Pures
	CHARACHON Robert	Oto-Rhino-Laryngologie
	CHATEAU Robert	Thérapeutique
	CHENE Marcel	Chimie papetière
	COEUR André	Pharmacie chimique
	CONTAMIN Robert	Clinique gynécologique
	COUDERC Pierre	Anatomie Pathologique
	CRAYA Antoine	Mécanique
Mme	DEBELMAS Anne-Marie	Matière médicale
MM.	DEBELMAS Jacques	Géologie générale
	DEGRANGE Charles	Zoologie
	DESRE Pierre	Métallurgie
	DESSAUX Georges	Physiologie animale
	DODU Jacques	Mécanique appliquée
	DOLIQUE Jean-Michel	Physique des plasmas
	DREYFUS Bernard	Thermodynamique
	DUCROS Pierre	Cristallographie
	DUGOIS Pierre	Clinique de Dermatologie et Syphiligraphie
	FAU René	Clinique neuro-psychiatrique
	FELICI Noël	Electrostatique

MM.	GAGNAIRE Didier	Chimie physique
	GALLISSOT François	Mathématiques Pures
	GALVANI Octave	Mathématiques Pures
	GASTINEL Noël	Analyse numérique
	GEINDRE Michel	Electroradiologie
	GERBER Robert	Mathématiques Pures
	GIRAUD Pierre	Géologie
	KLEIN Joseph	Mathématiques Pures
Mme	KOFLER Lucie	Botanique et Physiologie végétale
MM.	KOSZUL Jean-Louis	Mathématiques Pures
	KRAVTCHENKO Julien	Mécanique
	KUNTZMANN Jean	Mathématiques Appliquées
	LACAZE Albert	Thermodynamique
	LACHARME Jean	Biologie végétale
	LAJZEROWICZ Joseph	Physique
	LATREILLE René	Chirurgie générale
	LATURAZE Jean	Biochimie pharmaceutique
	LAURENT Pierre	Mathématiques Appliquées
	LEDRU Jean	Clinique médicale B
	LLIBOUTRY Louis	Géophysique
	LOUP Jean	Géographie
Mle	LUTZ Elisabeth	Mathématiques Pures
	MALGRANGE Bernard	Mathématiques Pures
	MALINAS Yves	Clinique obstétricale
	MARTIN-NOEL Pierre	Seméiologie médicale
	MASSEPORT Jean	Géographie
	MAZARE Yves	Clinique médicale A
	MICHEL Robert	Minéralogie et Pétrographie
	MOURIQUAND Claude	Histologie
	MOUSSA André	Chimie nucléaire
	NEEL Louis	Physique du Solide
	OZENDA Paul	Botanique
	PAUTHENET René	Electrotechnique
	PAYAN Jean-Jacques	Mathématiques Pures
	PEBAY-PEYROULA Jean-Claude	Physique
	PERRET René	Servomécanismes
	PILLET Emile	Physique industrielle
	RASSAT André	Chimie systématique
	RENARD Michel	Thermodynamique
	REULOS René	Physique industrielle
	RINALDI Renaud	Physique
	ROGET Jean	Clinique de pédiatrie et de puériculture
	SANTON Lucien	Mécanique
	SEIGNEURIN Raymond	Microbiologie et Hygiène
	SENGEL Philippe	Zoologie
	SILBERT Robert	Mécanique des fluides
	SOUTIF Michel	Physique générale
	TANCHE Maurice	Physiologie
	TRAYNARD Philippe	Chimie générale
	VAILLAND François	Zoologie
	VALENTIN Jacques	Physique Nucléaire
	VAUQUOIS Bernard	Calcul électronique
Mme	VERAIN Alice	Pharmacie galénique
M.	VERAIN André	Physique
Mme	VEYRET Germaine	Géographie
MM.	VEYRET Paul	Géographie
	VIGNAIS Pierre	Biochimie médicale
	YOCCOZ Jean	Physique nucléaire théorique

PROFESSEURS ASSOCIES

MM.	BULLEMER Bernhard	Physique
	HANO JUN-ICHI	Mathématiques Pures
	STEPHENS Michaël	Mathématiques Appliquées

PROFESSEURS SANS CHAIRE

MM.	BEAUDOING André	Pédiatrie
Mme	BERTRANDIAS Françoise	Mathématiques Pures
MM.	BERTRANDIAS Jean-Paul	Mathématiques appliquées
	BIAREZ Jean-Pierre	Mécanique
	BONNETAIN Lucien	Chimie minérale
Mme	BONNIER Jane	Chimie générale
MM.	CARLIER Georges	Biologie végétale
	COHEN Joseph	Electrotechnique
	COUMES André	Radioélectricité
	DEPASSEL Roger	Mécanique des Fluides
	DEPORTES Charles	Chimie minérale
	GAUTHIER Yves	Sciences biologiques
	GAVEND Michel	Pharmacologie
	GERMAIN Jean Pierre	Mécanique
	GIDON Paul	Géologie et Minéralogie
	GLENAT René	Chimie organique
	HACQUES Gérard	Calcul numérique
	JANIN Bernard	Géographie
Mme	KAHANE Josette	Physique
MM.	MULLER Jean-Michel	Thérapeutique
	PERRIAUX Jean-Jacques	Géologie et minéralogie
	POULOUJADOFF Michel	Electrotechnique
	REBECQ Jacques	Biologie (CUS)
	REVOL Michel	Urologie
	REYMOND Jean-Charles	Chirurgie générale
	ROBERT André	Chimie papetière
	DE ROUGEMONT Jacques	Neurochirurgie
	SARRAZIN Roger	Anatomie et chirurgie
	SARROT-REYNAULD Jean	Géologie
	SIBILLE Robert	Construction Mécanique
	SIROT Louis	Chirurgie générale
Mme	SOUTIF Jeanne	Physique générale

MAITRES DE CONFERENCES ET MAITRES DE CONFERENCES AGREGES

Mle	AGNIUS-DELORD Claudine	Physique pharmaceutique
	ALARY Josette	Chimie analytique
MM.	AMBLARD Pierre	Dermatologie
	AMBROISE-THOMAS Pierre	Parasitologie
	ARMAND Yves	Chimie
	BEGUIN Claude	Chimie organique
	BELORIZKY Elie	Physique
	BENZAKEN Claude	Mathématiques Appliquées
	BILLET Jean	Géographie
	BLIMAN Samuel	Electronique (EIE)
	BLOCH Daniel	Electrotechnique
Mme	BOUCHE Liane	Mathématiques (CUS)
MM.	BOUCHET Yves	Anatomie
	BOUVARD Maurice	Mécanique des Fluides

MM.	BRODEAU François	Mathématiques (IUT B)
	BRUGEL Lucien	Energétique
	BUISSON Roger	Physique
	BUTEL Jean	Orthopédie
	CHAMBAZ Edmond	Biochimie médicale
	CHAMPETIER Jean	Anatomie et organogénèse
	CHIAVERINA Jean	Biologie appliquée (EFP)
	CHIBON Pierre	Biologie animale
	COHEN-ADDAD Jean-Pierre	Spectrométrie physique
	COLOMB Maurice	Biochimie médicale
	CONTE René	Physique
	COULOMB Max	Radiologie
	CROUZET Guy	Radiologie
	DURAND Francis	Métallurgie
	DUSSAUD René	Mathématiques (CUS)
Mme	ETERRADOSSI Jacqueline	Physiologie
MM.	FAURE Jacques	Médecine légale
	GENSAC Pierre	Botanique
	GIDON Maurice	Géologie
	GRIFFITHS Michaël	Mathématiques Appliquées
	GROULADE Joseph	Biochimie médicale
	HOLLARD Daniel	Hématologie
	HUGONOT Robert	Hygiène et Médecine préventive
	IDELMAN Simon	Physiologie animale
	IVANES Marcel	Electricité
	JALBERT Pierre	Histologie
	JOLY Jean-René	Mathématiques Pures
	JOUBERT Jean-Claude	Physique du Solide
	JULLIEN Pierre	Mathématiques Pures
	KAHANE André	Physique générale
	KUHN Gérard	Physique
	LACOUME Jean-Louis	Physique
Mme	LAJZEROWICZ Jeannine	Physique
MM.	LANCIA Roland	Physique atomique
	LE JUNTER Noël	Electronique
	LEROY Philippe	Mathématiques
	LOISEAUX Jean-Marie	Physique Nucléaire
	LONGEQUEUE Jean-Pierre	Physique Nucléaire
	LUU DUC Cuong	Chimie Organique
	MACHE Régis	Physiologie végétale
	MAGNIN Robert	Hygiène et Médecine préventive
	MARECHAL Jean	Mécanique
	MARTIN-BOUYER Michel	Chimie (CUS)
	MAYNARD Roger	Physique du Solide
	MICHOULIER Jean	Physique (I.U.T. "A")
	MICOUD Max	Maladies infectieuses
	MOREAU René	Hydraulique (INP)
	NEGRE Robert	Mécanique
	PARAMELLE Bernard	Pneumologie
	PECCOUD François	Analyse (IUT B)
	PEFFEN René	Métallurgie
	PELMONT Jean	Physiologie animale
	PERRET Jean	Neurologie
	PERRIN Louis	Pathologie expérimentale
	PFISTER Jean-Claude	Physique du Solide
	PHELIP Xavier	Rhumatologie
Mle	PIERY Yvette	Biologie animale

MM.	RACHAIL Michel	Médecine interne
	RACINET Claude	Gynécologie et obstétrique
	RENAUD Maurice	Chimie
	RICHARD Lucien	Botanique
Mme	RINAUDO Marguerite	Chimie macromoléculaire
MM.	ROMIER Guy	Mathématiques (IUT B)
	SHOM Jean Claude	Chimie Générale
	STIEGLITZ Paul	Anesthésiologie
	STOEBNER Pierre	Anatomie pathologique
	VAN CUTSEM Bernard	Mathématiques Appliquées
	VEILLON Gérard	Mathématiques Appliquées (INP)
	VIALON Pierre	Géologie
	VOOG Robert	Médecine interne
	VROUSSOS Constantin	Radiologie
	ZADWORNY François	Electronique

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES

MM.	BOUDOURIS Georges	Radioélectricité
	CHEEKE John	Thermodynamique
	GOLDSCHMIDT Hubert	Mathématiques
	SIDNEY STUARD	Mathématiques Pures
	YACOUD Mahmoud	Médecine légale

CHARGES DE FONCTIONS DE MAITRES DE CONFERENCES

Mme	BERIEL Hélène	Physiologie
Mme	RENAUDET Jacqueline	Microbiologie

Fait le 30 Mai 1972

A ma mère, pour son amour et son dévouement,

Je tiens à exprimer ici ma profonde gratitude à

Monsieur le Professeur KUNTZMANN, Directeur de l'Institut de Mathématiques Appliquées de Grenoble, Président de la Commission Académique de la Recherche Pédagogique, qui a bien voulu me faire l'honneur de présider le jury de cette thèse,

Monsieur le Professeur PILLET, Directeur de la Section Electrotechnique de l'U. E. R. d'Electrotechnique et de Génie Physique de l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail,

Monsieur le Professeur RYCKELYNCK, Directeur des Etudes à l'Ecole Supérieure d'Electricité, Président de la Section Enseignement de la S. E. E., qui a bien voulu honorer le jury de sa présence,

Monsieur le Professeur BOUSSARD, qui a été Responsable de l'équipe d'Enseignement Assisté de l'I. M. A. G., pour avoir accepté de participer à ce jury,

Monsieur SABONNADIERE, Maître de Conférences, qui m'a constamment guidé au cours de cette étude sans ménager ses conseils et ses encouragements, qu'il soit assuré de ma sincère amitié,

Monsieur SUSSMAN, Professeur au Département de Génie Civil du M. I. T. et à Monsieur PORÈE, Attaché Scientifique à Cambridge, qui ont facilité la réalisation de mon stage au M. I. T.

Je remercie chaleureusement

Mes camarades du Laboratoire d'Electrotechnique de l'I. N. P. G. et, en particulier, Monsieur DUCLOZ, Maître-Assistant, pour les conseils qu'il m'a apportés dans la partie Electrotechnique de ce travail,

Les membres de l'équipe SOCRATE pour leurs judicieux conseils, en particulier Monsieur Robert MORIN.

Je remercie particulièrement Mademoiselle SAUVE. Elle a réalisé l'impression de ce travail avec soin, gentillesse et bonne humeur.

S O M M A I R E

Pages

INTRODUCTION..... 3

PREMIERE PARTIE : FONDEMENTS DU SYSTEME ESPACE..... 7

CHAPITRE 1 - Caractéristiques générales des projets de machines électriques..... 8

CHAPITRE 2 - Essai de définition d'un environnement pédagogique des projets de machines électriques..... 13

CHAPITRE 3 - Etude bibliographique fondamentale..... 20

DEUXIEME PARTIE : PRINCIPES TECHNIQUES DU SYSTEME ESPACE..... 33

CHAPITRE 1 - Introduction à la réalisation du système ESPACE : présentation générale..... 34

CHAPITRE 2 - Le modèle potentiel..... 38

A - Les informations et leur représentation dans les mémoires de l'ordinateur..... 38

B - Les algorithmes et leur composition..... 50

CHAPITRE 3 - Interface de communications du système ESPACE..... 57

CHAPITRE 4 - Organisation des programmes dans le système ESPACE..... 66

TROISIEME PARTIE : EXEMPLE DE REALISATION, LE TRANSFORMATEUR.. 74

CHAPITRE 1 - Le modèle potentiel..... 76

CHAPITRE 2 - Le langage de commandes..... 91

CHAPITRE 3 - Exemple de conception d'un projet de transformateur avec le système ESPACE..... 107

Pages

CONCLUSION..... 127

ANNEXE A - METHODES DE COMPOSITION DES ALGORITHMES..... 133

ANNEXE B - PROGRAMMES D'APPLICATION GRAPHIQUE UTILISES PAR LA VERSION ACTUELLE DU SYSTEME ESPACE..... 137

ANNEXE C - EXEMPLES D'ENTITES ET DE STRUCTURE DE REALISATIONS : LE CIRCUIT MAGNETIQUE D'UN TRANSFORMATEUR..... 139

ANNEXE D - EXEMPLE DE CREATION D'UN LANGAGE DE COMMANDES.... 146

ANNEXE E - EXTRAIT DES CODES DES MESSAGES ET DES ERREURS.... 151

BIBLIOGRAPHIE..... 154

INTRODUCTION

Le métier de l'ingénieur est de créer et pour cela, de réaliser constamment un compromis entre l'abstrait et le tangible, c'est-à-dire entre la théorie scientifique et la réalité pratique. Pour l'ingénieur, les connaissances scientifiques ne sont pas une fin, mais le moyen de concevoir des systèmes, dispositifs ou produits nouveaux et utiles.

Ainsi, l'enseignement scientifique seul n'est pas suffisant à la formation de l'ingénieur. Il est, en plus, nécessaire de combler le fossé qui sépare l'assimilation de connaissances scientifiques et la réalisation de projets de type industriel. Dans ces projets, l'ingénieur doit être capable de discerner, d'une part, les différents phénomènes scientifiques et économiques qui y interviennent, avec leurs intéractions et, d'autre part, l'impact de la technologie sur ces phénomènes.

En fait, plus généralement, tous ces projets ont des structures similaires, composées d'un ensemble de phénomènes intéractifs, pour lesquels il existe des modèles mathématiques, souvent constitués d'équations de formes voisines et d'un ensemble de facteurs dont l'impact sur les phénomènes n'a pas de formulation mathématique connue ou satisfaisante. Alors, les problèmes posés par différents projets industriels peuvent être abordés et traités par des méthodes analogues.

L'enseignement de ces méthodes constitue le complèment de l'enseignement scientifique nécessaire à la formation de l'ingénieur.

Bien qu'il soit possible de regrouper ces méthodes sous forme de disciplines formelles (analyse numérique, recherche opérationnelle, ...), la conception de projets demeure un art nécessitant des qualités qui ne peuvent être développées que par une pratique courante (14).

Cette pratique se fait dans les écoles d'ingénieurs, lors des travaux dirigés, des travaux pratiques et de la réalisation de projets.

Les travaux dirigés et les travaux pratiques constituent l'application, sur différents modèles théoriques et expérimentaux, des lois scientifiques étudiées dans le cours. Les uns et les autres, de par leur définition, ne constituent que des approches de la conception de projets et ne permettent pas de communiquer aux élèves toutes les méthodes et toutes les qualités nécessaires à l'ingénieur.

La réalisation de projets, dans une école d'ingénieurs, présente donc une importance capitale car c'est le seul exercice complet : l'élève doit fournir un travail d'ingénieur, dans un milieu non industriel où les contingences matérielles moindres, le rendent plus apte à assimiler de nouvelles méthodes et à développer ses qualités fondamentales d'ingénieur. L'amélioration de l'environnement pédagogique des projets des élèves peut donc permettre d'atteindre un équilibre plus harmonieux entre l'enseignement scientifique et l'enseignement des méthodes et techniques et présente, ainsi, un intérêt considérable.

Or, l'enseignement supérieur est aujourd'hui caractérisé par une expansion à la fois du nombre des étudiants et des connaissances. La première se traduit par le fait que l'enseignement supérieur devient un enseignement de masse ; il est donc nécessaire de rechercher de nouveaux moyens de transmettre l'éducation à un plus grand nombre d'étudiants, avec une efficacité plus grande.

D'autre part, l'expansion des connaissances a pour conséquences leur dévalorisation rapide : "la mémoire perd de son importance" (31). Dans la formation de l'ingénieur, l'enseignement des méthodes n'en prend, ainsi, que plus de valeur. En effet, en lui apportant une vue plus systématique des problèmes, elles donnent à l'ingénieur les moyens de se libérer d'une spécialisation trop étroite.

La nécessité de faire face à cette double expansion de l'enseignement, nous fait assister, depuis quelques années, au développement de nouvelles techniques pédagogiques : enseignement programmé, enseignement assisté par ordinateur, méthodes audiovisuelles, ...

Cependant, dans le cadre de la formation technique supérieure, si ces procédés permettent d'améliorer l'enseignement scientifique, ils ne touchent qu'assez peu l'enseignement des méthodes et en particulier, l'environnement pédagogique des projets d'élèves ingénieurs.

L'amélioration en qualité et en efficacité de cet environnement nous paraît être une nécessité et pour cette raison, constitue le but de notre recherche.

Cependant, ce domaine de travail étant initialement trop vaste, nous l'avons, volontairement, limité à l'environnement des projets de machines électriques ; mais, au cours de notre exposé, nous essayerons de généraliser les principes qui y sont développés. Les machines électriques présentent, en effet, pour notre recherche, un double intérêt : d'une part, nous disposons d'élèves ingénieurs électrotechniciens, susceptibles de nous permettre d'apprécier la valeur pédagogique de nos réalisations et d'en corriger, ainsi, les défauts ; d'autre part, un projet de machine électrique est le premier projet réalisé par ces élèves. En effet, ce type de projet est à la fois suffisamment complexe pour réunir presque toutes les fonctions formatrices que peut posséder un projet et suffisamment facile pour permettre à l'élève d'y faire son apprentissage avec profit. C'est donc sur ce type de conception qu'il était préférable de commencer notre travail.

Ce travail nous a conduit à élaborer un système pédagogique de conception assistée par ordinateur, dont nous présentons la réalisation en trois parties :

1°) Fondements du système ESPACE ;

2°) Principes techniques du système ESPACE ;

3°) Exemple de réalisation : le transformateur.

Dans la première partie, nous recherchons la nature fondamentale des projets de machines électriques. Nous en déduisons les types de problèmes qui s'y posent et la méthode générale de conception qui en découle (Chapitre 1). Nous étudions, ensuite, l'apport pédagogique du projet d'élève - ingénieur et son intégration dans l'enseignement général. Nous retenons de cette analyse la nécessité de concevoir un système informatique d'aide pédagogique à la conception (Chapitre 2). Nous présentons une étude bibliographique sommaire des réalisations actuelles qui ont influencé notre travail (Chapitre 3).

Dans la deuxième partie, un aperçu général du système ESPACE est donné, où nous mentionnons ses principaux composants (Chapitre 1). Nous analysons, ensuite, les principes techniques d'organisation des informations et de composition des algorithmes (Chapitre 2), avant de présenter les moyens de communications mis à la disposition de l'utilisateur du système (Chapitre 3). Enfin, les problèmes d'organisation des programmes et d'assistance à l'implantation d'un nouveau modèle de machine électrique dans le système font l'objet d'un chapitre spécial (Chapitre 4).

Dans la troisième partie, nous décrivons le modèle de transformateur actuellement implanté dans le système (Chapitre 1) et le langage de commandes associé (Chapitre 2). Nous terminons par un exemple de conception d'un projet de transformateur avec le système ESPACE (Chapitre 3).

En conclusion, nous faisons une analyse critique du système, à partir de laquelle un essai de généralisation nous conduira à prévoir les futurs développements de notre travail.

PREMIERE PARTIE - FONDEMENTS DU SYSTEME ESPACE

CHAPITRE 1 - CARACTERISTIQUES GENERALES DES PROJETS DE MACHINES ELECTRIQUES ((3), (14), (15), (20), (36))

La conception d'un projet peut être définie de manière générale, comme la création d'un système final satisfaisant à certaines contraintes et fonctions. A la base de tout système, nous trouvons la notion d'élément : par ce terme, nous signifions toute entité qui peut être séparée de son environnement par des discontinuités fixes (14). Un élément possède, de ce fait, des propriétés qui lui sont spécifiques.

Utilisant cette notion, nous définissons la primitive d'un projet comme étant l'ensemble des éléments et de leurs combinaisons possibles, à l'intérieur duquel seront choisis les constituants du système et leur mode d'assemblage (14). Cette définition nous permet de ranger les différents projets dans l'une des deux classes suivantes (14).

1°) Celle des projets fermés, dont les primitives sont connues à l'avance,

2°) Celle des projets ouverts, dont les primitives sont partiellement ou totalement inconnues à l'avance.

A l'exception de quelques cas particuliers, les projets de machines électriques sont typiquement des projets fermés. Dans la suite de ce chapitre et dans les chapitres suivants, nous nous intéresserons donc surtout à cette classe de projets.

La conception d'un projet est fondamentalement la résolution d'un ensemble de problèmes. Ces derniers peuvent être de trois types et s'expriment de la manière suivante : X et Y étant deux ensembles finis de paramètres, ceux de X représentant les performances du système à concevoir, ceux de Y caractérisant les éléments choisis et leur combinaison dans le système et T étant un ensemble de relations entre les paramètres de X et ceux de Y, il s'agit de résoudre $Y = T(X)$; pour

le premier type de problèmes, on se donne X et Y et l'inconnue est T, pour le deuxième X est l'inconnue et pour le troisième, c'est Y (3).

Dans les problèmes de type 1, les relations entre les divers paramètres sont cachées ou inconnues et doivent être mises à jour. Ces problèmes sont typiques des projets ouverts. Inversement, ils ne se rencontrent pas dans les projets de machines électriques et, d'une manière générale, dans les projets fermés. En effet, les primitives de ces projets ont été déterminées lors de plusieurs réalisations antérieures de projets du même type. Bien que certaines des relations peuvent demeurer, théoriquement, inconnues, elles sont remplacées soit par des relations empiriques, soit, à la limite, par l'expérience du concepteur, fondées sur les essais des réalisations précédentes.

Les problèmes de type 2, consistent à inverser T, afin d'obtenir des problèmes du type 3. Mais, dans presque tous les cas pratiques, et c'est celui des machines électriques, certaines des relations de T sont soit non linéaires, soit non continues, soit non buinivoques. T n'est donc pas inversible, la solution n'est pas unique et, souvent, non continue, en fonction des données.

Le type 3 de problèmes, se traduit par l'évaluation d'expressions théoriques ou empiriques connues portant sur des paramètres connus.

Dans le cadre de la conception de machines électriques, l'ingénieur ou l'élève a donc à résoudre des problèmes des types 2 et 3, son but étant de créer un système satisfaisant les objectifs fixés initialement dans le cahier des charges. Ces objectifs sont de natures extrêmement diverses et ne sont pas toujours très clairement définis. Ils regroupent :

1°) Les fonctions que foit assurer le système final. Ces fonctions définissent comment doit réagir le système lorsqu'il est soumis à un ensemble donné d'excitations et caractérisent les performances du système,

2°) La satisfaction des impératifs dus, aux normes de sécurité, aux conditions d'utilisation et à la normalisation de certains éléments,

3°) L'optimisation économique du système.

Ces objectifs agissent constamment sur le processus de conception.

Ce dernier comporte trois phases principales : la sélection des éléments qui composeront le système, la combinaison de ces éléments dans le système et la détermination des performances du système total. Les deux premières phases constituent la synthèse du projet : elles posent surtout des problèmes de type 2. La troisième phase est l'analyse du système créé : elle nécessite la résolution de problèmes de type 3.

Les problèmes de type 2 sont résolus de façon itérative et imposent une méthode globale de conception itérative dite aussi d'essais erreurs. Cette méthode répartit les trois phases du processus de conception sur cinq étapes distinctes de travail. Ces cinq étapes schématisées à la figure 1 sont les suivantes (36) :

1°) La prédétermination du système durant laquelle sont choisis et combinés les éléments formant le système (dans notre cas, la machine électrique), compte tenu des fonctions qu'il doit posséder,

2°) La prédiction des performances par l'analyse du système précédemment conçu. Dans le cas des machines électriques, cette analyse se fait par le calcul,

3°) L'évaluation des résultats de l'analyse précédente en fonction des objectifs,

4°) La modification du système afin de corriger les erreurs ou imperfections relevées à l'étape précédente,

5°) La simulation du système final. Nous pensons, en effet, que cette étape fait partie du processus de la conception, car les essais réels ne peuvent être faits pour tous les projets des élèves. Cette simulation peut conduire à apporter de nouvelles corrections au système final.

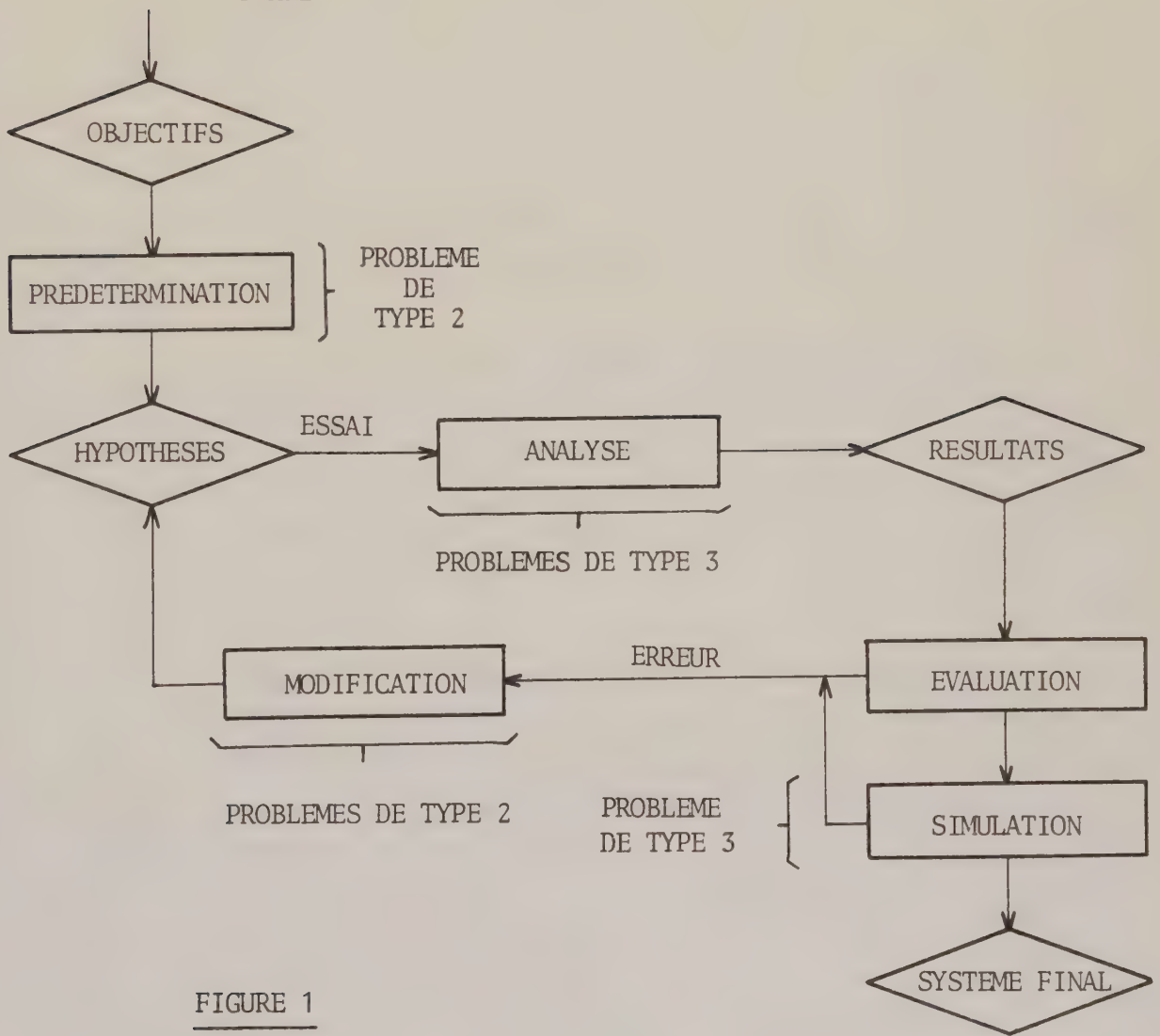


FIGURE 1

Les étapes de prédétermination et de modification posent des problèmes de type 2 : on y retrouve les phases de sélection et de combinaison des éléments du système.

Les étapes d'analyse et de simulation posent des problèmes de type 3 : on y retrouve la phase de détermination des performances du système.

Mais un projet est en général trop complexe pour pouvoir être totalement prédéterminé. Pour cette raison, les éléments sélectionnés sont combinés en éléments plus complexes ou sous-systèmes du système final, eux-mêmes regroupés en nouveaux sous-systèmes, jusqu'à l'obtention du projet complet. Ainsi, les premières itérations ne prennent en compte que des parties de projet. Au cours du processus de conception, la description du projet devient donc de plus en plus complète et les approximations de plus en plus précises. A la nature fondamentalement itérative de la méthode précédemment décrite, il est nécessaire d'ajouter ses aspects hiérarchisés (décomposition en sous-système) et associatif (combinaison de sous-systèmes entre eux) (20).

Outre cette méthode globale, valable pour l'ensemble des projets de machines électriques, il peut être nécessaire d'appliquer à certaines des étapes, des méthodes plus particulières et plus spécifiques du projet à réaliser. Alors que la première est imposée par les types des problèmes posés, les secondes peuvent être choisies plus librement par le concepteur.

En résumé, l'étude des caractéristiques générales des projets de machines électriques nous a permis d'aborder, dans ce chapitre, trois notions importantes qui sont celles de projet fermé, de types de problème et de méthode globale de conception. Elles seront fondamentales dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 2 - ESSAI DE DEFINITION D'UN ENVIRONNEMENT PEDAGOGIQUE DES PROJETS DE MACHINES ELECTRIQUES

((7), (8), (14), (37), (40), (50))

Les fonctions formatrices du projet sont nombreuses et diverses ; elles ont comme objectifs principaux (7) :

- d'apprendre à l'élève la relation entre la théorie et la pratique,
- de développer son esprit de synthèse et d'analyse,
- de lui enseigner une méthode logique de conception,
- de lui donner confiance en ses connaissances théoriques par une réalisation pratique,
- d'améliorer ses qualités de créativité, d'imagination, d'initiative, d'intuition et de jugement,
- de développer son esprit interrogateur pour le conduire à critiquer ses efforts,
- de lui inculquer le principe industriel des moindres coûts de revient.

Ainsi, le projet apparaît comme un puissant outil de formation de l'ingénieur.

La conception des projets ouverts étant, en général, plus difficile que celle des projets fermés, il semble, pédagogiquement, préférable que l'élève fasse son apprentissage de la conception sur un projet fermé. Cependant, pour que ce dernier assume pleinement ses fonctions formatrices, il doit être inséré convenablement dans l'enseignement. Cette insertion constituera le rôle de l'environnement pédagogique du projet.

Cet environnement regroupe tout ce qui est mis à la disposition de l'élève et qui fait le lien entre les connaissances théoriques enseignées et la conception pratique du projet ; dans le cas des machines électriques, il est surtout composé par :

1°) Un cours de construction et de calcul du matériel électrique

Ce cours, fondé à la fois sur la théorie scientifique et l'expérience pratique de plusieurs entreprises de construction de matériel électrique, supplée, pour l'essentiel, au manque total d'expérience qu'a l'élève, en la matière. Dans ce but, il réunit l'enseignement de la construction qui décrit les composants des machines et leurs modes d'assemblage possibles et l'enseignement des calculs qui développe un ensemble utile de relations théoriques et de relations empiriques, ou autres palliatifs nécessaires de la théorie. C'est ce cours qui permet au projet de machine électrique de pouvoir être considéré comme un projet fermé.

2°) La documentation technique

Elle réunit, généralement :

- des revues,
- la liste des matériaux utilisables et de leurs propriétés, normes comprises,
- un exemple d'établissement de projet,
- la fiche technique d'un projet industriel déjà réalisé.

3°) L'encadrement lors de la réalisation du projet

Il est réalisé par une ou plusieurs personnes susceptibles de conseiller l'élève dans son travail de conception.

4°) Les outils de travail

Ce peut être :

- la règle à calcul,
- la machine à calculer de bureau,
- l'ordinateur.

De plus, pour éveiller le maximum d'intérêt chez l'élève, le projet doit être proposé en termes de réalité industrielle.

Nous pensons que la structure générale de l'environnement pédagogique décrit est satisfaisante. Cependant, son contenu présente des inconvénients importants ; les outils offerts aux élèves ne nous paraissent pas, sous leur forme d'exploitation actuelle, adaptés aux buts recherchés.

Notons d'abord que les calculs (1) qu'il est nécessaire d'effectuer pour la réalisation d'un projet de machine électrique, ne présentent pas, généralement, de grande difficulté, mais ils sont longs et de plus, du fait de la méthode itérative à employer, ils sont répétitifs.

Un calcul complet à la main, à la règle à calcul ou à la machine de bureau, exige donc un temps extrêmement long. En conséquence, l'élève perd de vue le sens physique du projet et n'élabore qu'une seule solution, sans chercher à l'optimiser.

L'ordinateur constitue certes un net progrés sur les outils précédents, mais présente, en définitive, des inconvénients du même type. Les longs calculs sont remplacés par une programmation fastidieuse et peu formatrice, car, comme nous l'avons noté, les calculs nécessaires sont, en général, assez simples. Un programme complet de calcul présente même un inconvénient supplémentaire : le calcul

(1) : par calcul, nous entendons résolution de problème de type 3.

se faisant automatiquement, l'élève ne peut pas intervenir sur son déroulement et, ainsi, n'a pas à soutenir, de façon continue, un effort de jugement et d'initiative.

Les programmes écrits par l'élève et exécutés sous un système d'exploitation conversationnelle de l'ordinateur, restent, malgré cela, caractérisés par une grande rigidité de leur emploi et par une intéraction insuffisante entre l'élève et la progression des calculs.

Une combinaison des outils précédents associe leurs avantages, mais aussi leurs inconvénients et n'est guère plus satisfaisante.

Ces défauts ont pour conséquence de n'exploiter que partiellement le potentiel formateur du projet : les qualités de synthèse et d'analyse de l'élève sont insuffisamment développées. D'autre part, ils réagissent sur l'environnement pédagogique lui-même : en effet, pour que l'élève puisse réaliser son projet, il est nécessaire de lui fournir, initialement, un exemple d'établissement de projet, qui, même succinct, transforme souvent le processus de conception en l'exécution d'une "recette de cuisine" ne faisant que peu de place à l'imagination et au jugement de l'élève (14).

Pour éliminer ces défauts, il nous est apparu nécessaire de concevoir un dispositif évitant à l'élève les calculs et la programmation, trop longs et peu formateurs. De par sa nature, ce dispositif ne peut être qu'un système informatique réunissant les programmes de calculs des machines électriques. Mais pour satisfaire aux buts formateurs du projet, la réalisation de ce système doit être fondée sur les principes suivants :

1°) L'élève doit garder, à tout moment, le contrôle absolu du développement de son projet

Cet impératif détermine le niveau d'intéraction entre l'élève et l'ordinateur, c'est-à-dire, la répartition du travail entre

eux. La partie active nécessitant intelligence, intuition, expérience, jugement et décision, doit toujours échoir à l'élève. A cet effet, seuls les calculs de résolution des problèmes de type 3 doivent être programmés. L'ordinateur est utilisé pour effectuer les calculs rapidement, mémoriser les informations et les présenter sur demande, sous la forme la plus utilisable possible.

Nous espérons qu'ainsi, l'élève se consacrera au sens véritable de son projet, à savoir, l'application de ses connaissances théoriques et pratiques à la conception.

2°) L'utilisation du système doit être particulièrement bien adaptée aux natures itératives, hiérarchisées et associatives de la conception de projet

afin de donner à l'élève les moyens de mieux découvrir, par lui-même, les étapes de la conception et d'éviter, de cette façon, la "recette de cuisine" peu formatrice.

Par ailleurs, le système doit être, ainsi, susceptible de se plier au raisonnement particulier de l'élève et de rendre possible une meilleure compréhension, par ce dernier, du sens physique du projet en visualisant rapidement l'influence d'une modification dans la réalisation du projet en cours.

Il est à noter que, bien que les différentes relations utiles, théoriques ou empiriques, soient programmées, le nombre de variables d'un projet est suffisamment grand pour que l'élève ne puisse pas arriver à un résultat satisfaisant s'il ne connaît pas, correctement, le contenu et la forme de ces relations.

3°) Les communications entre l'élève et l'ordinateur doivent être commodes, efficaces et naturelles.

L'élève ne doit pas avoir de difficulté, ni de contrainte, pour présenter ses décisions à l'ordinateur et aucune connaissance, en informatique, particulière ne doit lui être demandée.

En retour, l'ordinateur doit toujours présenter les résultats de façon claire et montrer distinctement les conséquences d'une décision.

4°) Pour posséder une plus grande efficacité, le système doit obtenir la confiance de l'élève (50) et, dans ce but, il doit réaliser une détection précise et correcte des erreurs faites par l'élève. C'est cependant la tâche de ce dernier de les corriger.

Le système peut, d'autre part, être capable de fournir, sur demande de l'élève, des renseignements concernant, par exemple, les matériaux ou certains projets industriels déjà réalisés. Ces informations doivent permettre une meilleure prise de décision et renforcer la confiance de l'élève dans ses initiatives.

Il est également très important que les temps de réponse du système soient aussi brefs que possible.

5°) Le système doit être capable de supporter des programmes écrits par l'élève

En effet, les efforts de programmation de l'élève peuvent, maintenant, être reportés sur certains problèmes plus particuliers et plus complexes de calcul ou de simulation de la machine élaborée. Cette programmation nécessite, généralement, l'emploi de méthodes enseignées dans le cours d'analyse numérique et est, de ce fait, plus

formatrice que la précédente. Il est extrêmement intéressant qu'elle puisse être intégrée au système, car, ainsi, l'élève peut en demander l'exécution au cours de l'élaboration du projet.

6°) L'utilisation du système ne doit pas apporter de contraintes ou limitations autres que celles relatives à la nature du projet à élaborer

afin de développer au mieux les qualités créatives de l'élève.

En conclusion, un tel système doit être beaucoup plus qu'un simple outil de travail pour l'élève : il constitue un véritable partenaire ((8),(40)). Mais, pour ce faire, il doit intégrer les ressources de l'ordinateur et les mettre au service de l'action formatrice du projet.

CHAPITRE 3 - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE FONDAMENTALE

Nous n'allons pas faire, dans ce chapitre, un résumé de toutes nos références bibliographiques ; nous y présentons seulement celles qui, ayant pour sujet soit la conception soit l'enseignement assisté par ordinateur, nous ont le plus enfluencé dans l'orientation de nos travaux. Nous avons réservé une place particulièrement importante au système ICES, car c'est de ce dernier que s'inspire le plus la réalisation de notre système

I - LE SYSTEME ICES (INTEGRATED CIVIL ENGINEERING SYSTEM) ((22), (37), (38), (39), (43), (44), (48), (49))

I - 1 - Description générale

Le système ICES a été conçu pour permettre à des ingénieurs connaissant peu la programmation d'utiliser l'ordinateur pour la résolution de nombreux problèmes industriels. ICES apparaît à l'utilisateur comme un ensemble de sous-systèmes, chacun ayant été réalisé dans le but de résoudre les problèmes propres à une discipline particulière. L'ingénieur peut utiliser un ou plusieurs de ces sous-systèmes lors de la résolution de son problème.

Un langage particulier est associé à chaque sous-système. Ce langage permet à l'ingénieur de spécifier aisément à l'ordinateur les conditions propres à son problème, ainsi que la manière de le résoudre.

D'autre part, le système ICES a été conçu avec une structure modulaire dans le but d'aider le programmeur d'un sous-système. En plus de FORTRAN, deux autres langages sont mis à la disposition de ce programmeur. Ce sont ICETRAN et CDL.

1°) ICETRAN est une extension de FORTRAN qui est utilisée par le programmeur d'un sous-système pour écrire les programmes d'application du sous-système. ICETRAN ajoute de nouvelles possibilités à celles de FORTRAN ; ce sont, en particulier :

- Celle d'utiliser des tableaux dynamiques ;
- Celle permettant d'avoir un accès commode aux mémoires secondaires ;
- Celle de donner à un programme général d'ICES des indications sur la gestion des programmes et des données dans les mémoires de l'ordinateur ; certaines instructions d'appel de procédure permettent le chargement dynamique en mémoire centrale de modules regroupant plusieurs procédures.

La compilation de programmes ICETRAN est résumée sur la figure 2.

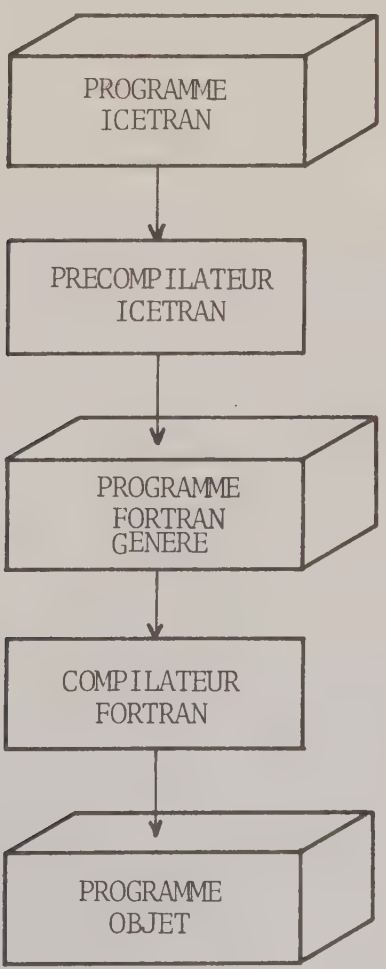


FIGURE 2 - Précompilation et compilation d'un programme ICETRAN.

2°) CDL est un langage de définition de commandes. Il est utilisé par le programmeur d'un sous-système pour définir comment chaque commande du langage associé au sous-système doit être traitée par ICES. La traduction d'un programme CDL est schématisée sur la figure 3.

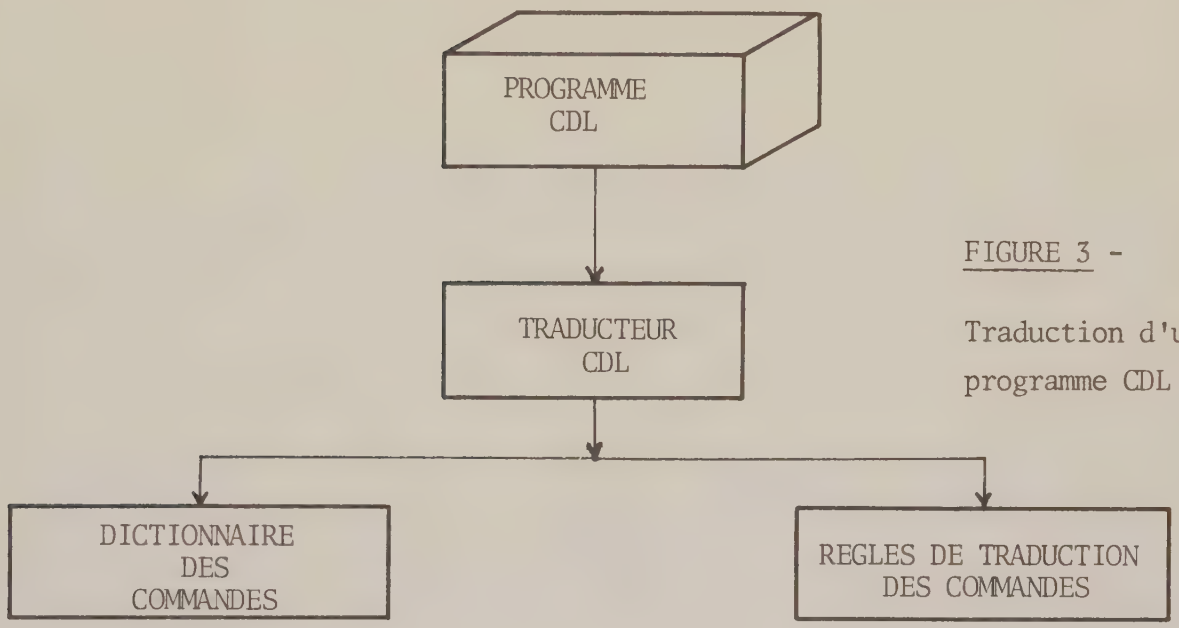


FIGURE 3 -

Traduction d'un programme CDL

Le schéma de la figure 4 résume le fonctionnement du système ICES lors de son utilisation par un ingénieur.

I - 2 - Apport d'ICES à notre système

Le système ICES a été réalisé au laboratoire de Génie Civil du Massachussets Institute of Technology. Par l'intermédiaire de la Mission Scientifique Française à Cambridge (Massachussets), nous avons eu la possibilité de travailler durant 2 mois dans ce laboratoire, conseillé par le Professeur J. SUSSMAN, l'un des principaux réalisateurs du système ICES.

Notre travail a comporté essentiellement deux parties :

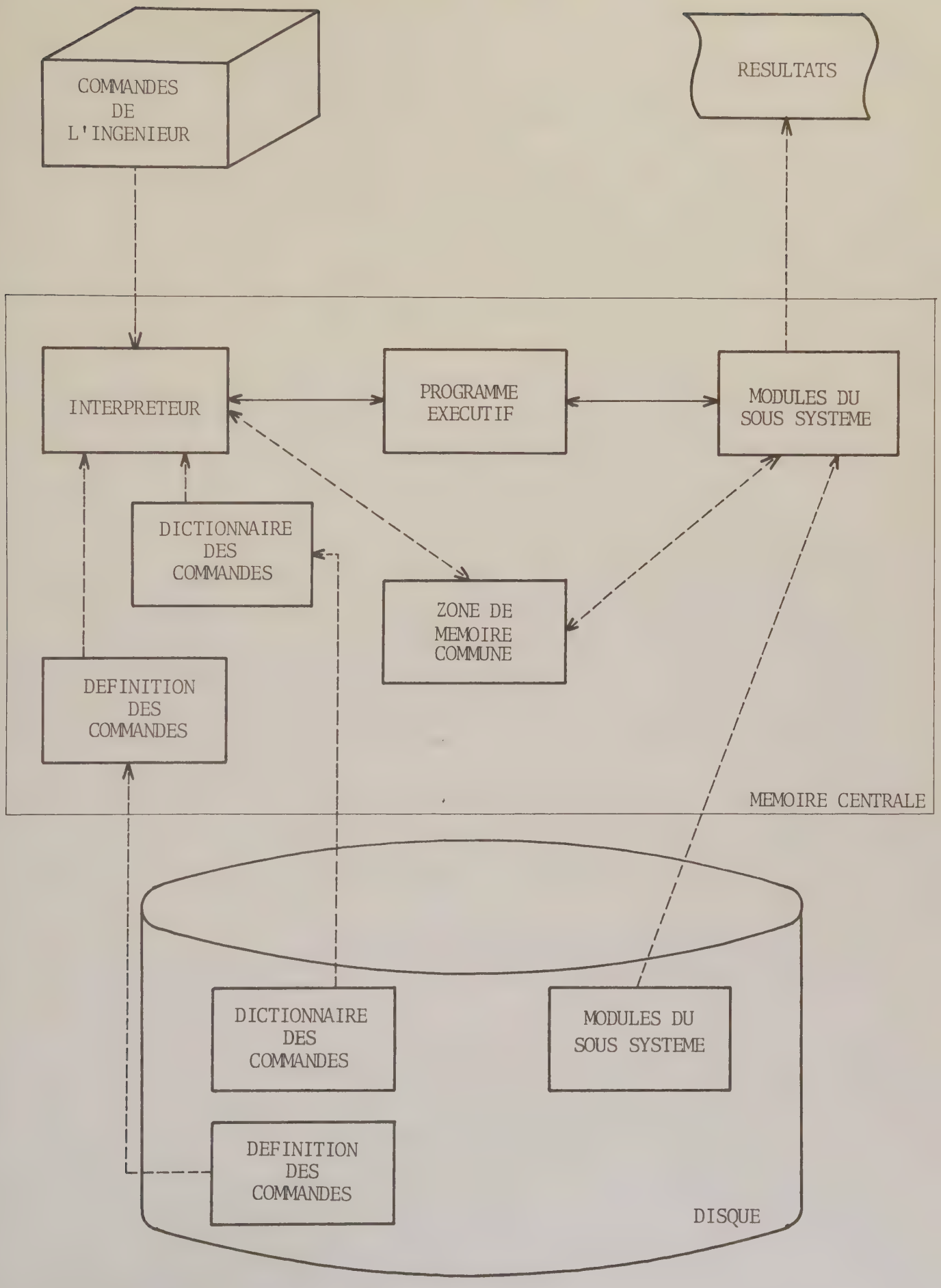


FIGURE 4 - Exécution d'une commande

1°) Réalisation d'un sous-système de taille réduite appliqué au circuit magnétique des transformateurs.

2°) Contribution à l'élaboration d'un programme graphique permettant de schématiser les résultats d'un sous-système simulant les trafics routiers, ferroviaires aériens dans le "couloir Nord-Est" (Boston, New York, Philadelphie, Baltimore, Washington).

La première partie nous a permis de nous familiariser avec les nombreuses ressources d'ICES. La deuxième nous a fait réaliser l'importance de la présentation graphique de résultats complexes.

D'autre part, bien qu'ICES ne soit pas conçu dans des buts d'enseignements, nous avons pu constater que les sous-systèmes variés (analyse de structures mécaniques, mécanique des sols, construction de ponts, construction de réseaux routiers, ...) sont utilisés, non seulement par les chercheurs du laboratoire et les ingénieurs d'entreprises de Génie Civil, mais aussi par les élèves pour la réalisation de projets ou d'exercices d'application des cours.

Comme il sera possible de le constater, l'apport d'ICES à notre système est considérable, surtout en ce qui concerne l'organisation des programmes et de leur fonctionnement.

Cependant, ICES présente certaines caractéristiques qui, pour notre utilisation, constituent des inconvénients importants, à savoir :

1°) Il est opérationnel sur IBM 360/65 et, à notre connaissance, toutes les entreprises utilisant le système dispose d'un ordinateur IBM semblable.

2°) Il est conçu pour fonctionner sous un système d'exploitation en batch processing (OS 360) et il n'existe actuellement aucune version disponible en time sharing.

3°) Il est réalisé pour supporter des sous-systèmes variés appliqués à des disciplines où les projets sont en général assez faciles à représenter dans les mémoires de l'ordinateur mais pour lesquels des algorithmes complexes et d'exécution longue sont nécessaires. Sa gestion de mémoire est alors trop générale et trop lourde pour nos types d'application. Par leur taille, les programmes généraux du système ICES imposent de travailler sur un ordinateur de taille importante.

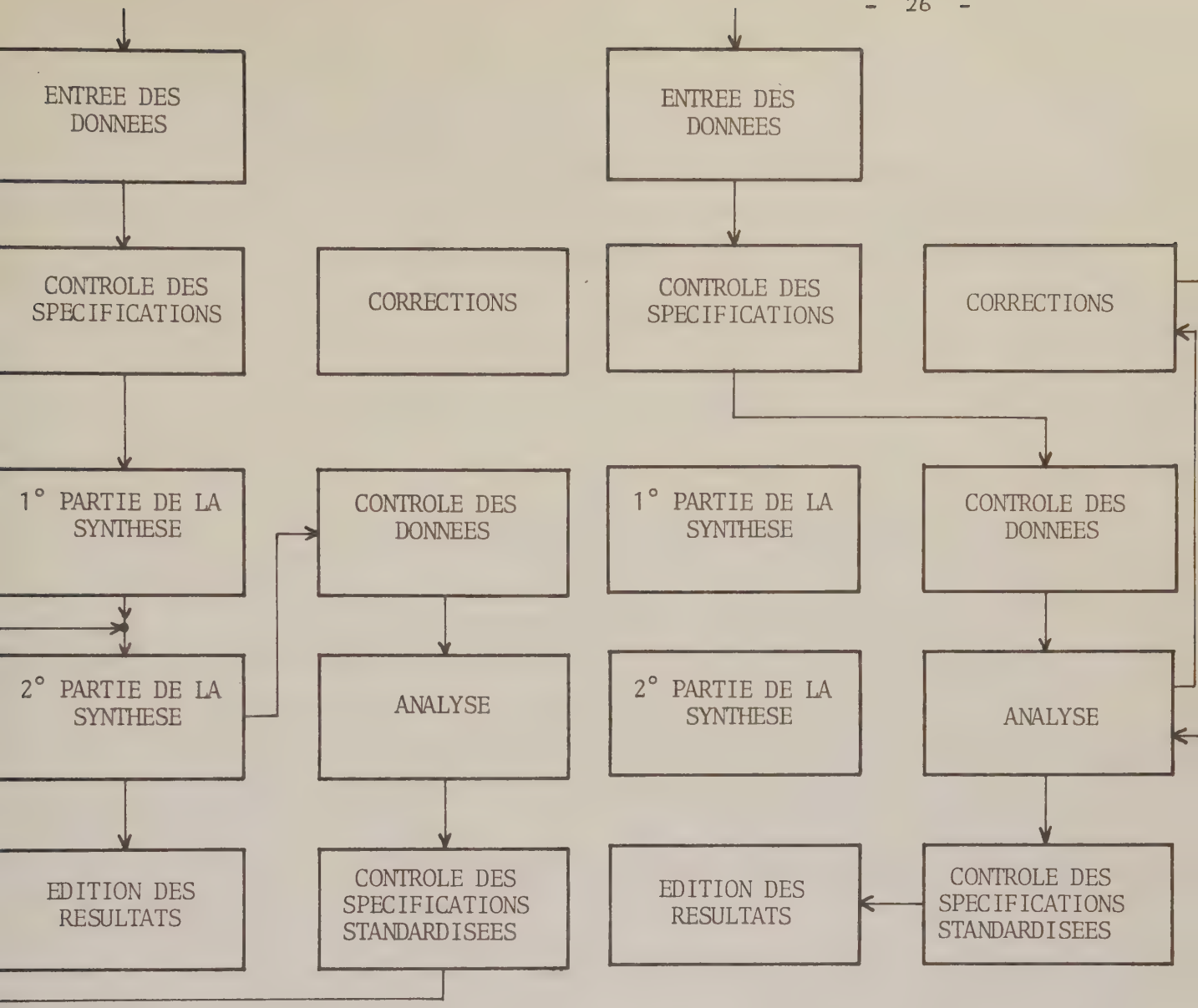
II - PROGRAMME DE CORRECTION DE PROJETS DE TRANSFORMATEUR ((13), (16))

II - 1 - Description générale

La première réalisation importante faite à l'Université Technique du Danemark, à Lyngby, dans le cadre de l'utilisation de l'ordinateur pour l'enseignement a été celle d'un programme de calcul de transformateur ; ce programme permet :

1°) L'optimisation économique d'un projet de transformateur (figure 5A).

2°) La correction automatique des projets des élèves (figure 5B).



A - Structure du programme pour l'optimisation économique.

B - Structure du programme pour la correction des projets des élèves.

L'intérêt de ce programme porte principalement sur quatre points :

1°) La correction des projets par ordinateur permet aux étudiants d'être rapidement confrontés avec leurs erreurs, alors qu'ils se souviennent encore de leur projet ;

2°) En évitant les corrections aux enseignants, ce programme leur permet de porter plus d'attention à l'évaluation du travail d'ingénieur effectivement réalisé par l'élève ;

3°) Les calculs optimisés des projets sont initialement effectués, permettant ainsi à des enseignants relativement peu expérimentés d'encadrer les projets des élèves ;

4°) L'élève peut être confronté avec la solution optimisée calculée par le programme.

II - 2 - Apport de cette réalisation à notre système

Outre cette réalisation, nous avons pu apprécier, à l'occasion d'une visite à l'Université de Lyngby, la variété des efforts qui y sont entrepris pour faire de l'ordinateur un outil efficace de formation de l'ingénieur. Les autres réalisations de cette Université sont principalement :

1°) Un programme de calcul et d'optimisation d'alternateur,

2°) Un langage de macros pour l'analyse des réseaux (19),

3°) Le langage de macros PROMAC d'aide à la réalisation de programmes de contrôle de processus en temps réel par IBM 1 800,

4°) L'étude du diagramme de Roth par exercices courts réalisés sur un terminal graphique et corrigés par l'ordinateur.

Ces applications variées de l'ordinateur à l'éducation d'élèves ingénieurs ont principalement pour but l'enseignement de méthodes générales. Elles permettent de montrer aux élèves que les mêmes méthodes de travail sont utilisées pour divers types de projets. Les responsables de cet enseignement certifient que cet ef-

fort constitue une réussite aussi bien sur le plan des études à l'Université que dans le comportement des élèves à la sortie de cette dernière.

Nous avons repris ces idées dans notre travail tout en préférant intégrer des applications variées dans un système unique afin de rendre leur utilisation par les élèves plus commode.

III - MAGISTER : LANGAGE POUR L'ECRITURE DE COURS ((2), (12))

III - 1 - Description générale

Le langage MAGISTER permet au professeur de rédiger son cours dans les mémoires de l'ordinateur. Pour cela, il lui fournit les instructions qui sont nécessaires pour morceler ou concaténer des chaînes de texte ou rechercher des modèles.

Les principales caractéristiques de ce langage sont :

1°) Sa généralité. Il permet d'accueillir des cours très divers.

2°) Son acquisition rapide par les professeurs. Ces derniers ne doivent pas être rebutés par un langage trop compliqué ; cependant, le langage reste efficace.

3°) Ses possibilités d'entension par une définition modulaire.

4°) Sa compilation conversationnelle grâce à un compilateur incrémentiel.

III - 2 - Apport du langage MAGISTER à notre système

Notre système est beaucoup plus proche de la conception assistée que de l'enseignement d'un cours assisté par ordinateur.

Pour cette raison, MAGISTER nous a peu apporté du point de vue technique. Par contre, l'idée qu'un professeur ayant peu de connaissances informatiques puisse construire et modifier son cours dans les mémoires de l'ordinateur nous paraît utile pour notre système, dans le but de le faire accepter plus volontiers par les professeurs. Aussi, bien qu'il ne soit pas possible d'imaginer, dans notre application particulière, un langage tel que MAGISTER pour satisfaire ce dernier objectif, nous développons de plus en plus des formes multiples d'assistance à la modification du système. Nous espérons, ainsi, rendre les programmes du système accessibles aux professeurs ne connaissant que la programmation élémentaire.

IV - PROGRAMMES INTERACTIFS POUR LA CONCEPTION ASSISTEE DE PROJET DE CIRCUITS (IMOL - COIF, IMAG2, CIRCAL, AEDNET, ...)

IV - 1 - Description du programme IMOL-COIF (5)

Lors de la réalisation d'un projet de circuit, il y a certains travaux qui nécessitent des opérations répétitives et d'autres qui nécessitent invention et adaptation à des situations inattendues. Ainsi, l'ordinateur et le concepteur présente des caractéristiques complémentaires.

Dans ce programme de conception assistée de projets de circuits, l'intéraction est fondée sur l'utilisation de deux langages de niveaux différents.

A un premier niveau, le langage IMOL fournit à l'utilisateur un ensemble de commandes à la fois simples et efficaces qui lui permettent d'effectuer les fonctions nécessaires à la conception de circuits.

A un deuxième niveau, le langage COIF est un langage à orientation graphique, qui permet de décrire, générer et manipuler les spécifications graphiques des problèmes. Il consiste en une extension de FORTRAN.

IV - 2 - Apport de ce programme à notre systeme

Ce programme n'est pas le seul existant dans ce domaine de la concpetion. Nous pourrions citer, entre autres, les programmes IMAG2 (28), CIRCAL (33), AEDNET (23), ... La plupart sont fréquemment employés dans l'enseignement, en particulier pour la simulation de réseaux. Ils ont généralement en commun plusieurs caractéristiques qui ont influencées la réalisation de notre système.

1°) Ces programmes organisent la mémoire de l'ordinateur afin d'y représenter le circuit à tous les moments de la conception. Cette organisation consiste à relier des blocs de mémoire par des "pointeurs" (adresse d'un bloc contenu par un autre bloc). Bien qu'elle soit plus complexe dans notre système, nous utilisons aussi ce type de représentation en mémoire.

2°) Les intéractions entre l'utilisateur et le programme sont efficaces.

3°) Les communications graphiques y sont employées de façon intensive.

CONCLUSION

Notre étude bibliographique générale nous a permis de constater que, dans les domaines de l'enseignement et de la conception assistés par ordinateur, de nombreuses recherches sont actuellement en cours. Certaines ont même déjà donné lieu à des résultats.

L'étude bibliographique précédente, bien que restreinte, montre plusieurs directions de recherche. Les expériences de l'Université Technique du Danemark nous ont particulièrement intéressés, parce qu'elles portent à la fois sur la conception et l'enseignement ; en outre en raison de leur succès pédagogiques, elles ont apporté une forte motivation à notre travail.

Par ailleurs, les programmes de calcul de réseaux électriques nous ont semblé ouvrir une nouvelle voie dans l'utilisation de l'ordinateur pour la conception ; ils ne limitent pas la créativité du concepteur dans un cadre rigide et étroit et leur utilisation dans l'enseignement s'est également révélée profitable. Cependant, de par leur nature, les réseaux sont plus facilement représentables dans les mémoires de l'ordinateur que les machines électriques ; l'effort de recherche est alors reporté sur la rapidité d'exécution des algorithmes.

De son côté, ICES ne constitue pas un simple programme, mais un système sous lequel peuvent être effectués des travaux très différents. ICES représente une tentative intéressante d'intégration d'un grand nombre de programmes réunis sous forme de plusieurs sous-systèmes au sein d'un ensemble unique d'accès commode. Nous reprenons l'idée sur le plan pédagogique, car il est nécessaire d'offrir à l'élève un système permettant la conception de projets de types variés.

Il nous paraît, enfin, essentiel de retenir pour notre réalisation l'idée fondamentale du langage d'écriture de cours, à savoir qu'un professeur ayant peu de connaissances informatiques doit pouvoir participer à l'enseignement par ordinateur. Nous pensons que cela constitue une condition nécessaire de réussite de cet enseignement. Néanmoins, dans le cas d'un système pédagogique de conception, il est nécessaire que le professeur ait la connaissance d'un langage de programmation scientifique (Fortran, Algol...).

DEUXIEME PARTIE - PRINCIPES TECHNIQUES DU SYSTEME ESPACE

CHAPITRE 1 - INTRODUCTION A LA REALISATION DU SYSTEME ESPACE : PRESENTATION GENERALE ((17), (37), (38), (39), (41))

Lorsque l'élève écrit un programme de calcul d'une machine électrique en utilisant un langage évolué tel que FORTRAN, ALGOL ou PL/1, il travaille à la fois sur deux modèles de la machine ; ce sont :

1°) Le modèle qu'il a conçu de la machine et qui est principalement formé d'équations mathématiques représentant certaines lois physiques,

2°) Le programme lui-même, qui est le modèle de la machine vu par l'élève à travers l'ordinateur. En effet, pour pouvoir utiliser ce dernier, l'élève doit se mettre à son niveau de "compréhension" caractérisé par le langage dans lequel sont écrits les programmes. Ceci fait, de ce deuxième modèle, un intermédiaire indispensable entre le premier et l'ordinateur.

Ces deux modèles, bien que représentatifs de la même machine électrique, sont perçus par l'élève, de manières très différentes. Le second apporte gêne et contrainte et détourne l'élève de la compréhension profonde de son projet.

Le rôle du système est de supprimer ce second modèle pour permettre à l'élève de se consacrer uniquement à l'étude du premier. Nous réalisons cette suppression en écrivant, nous-mêmes, la programmation, de manière à constituer, dans les mémoires de l'ordinateur, un modèle potentiel de chaque type de machine électrique. Ce modèle doit être capable d'évoluer en fonction de la description que fait l'élève de son projet, dans le but d'effectuer, convenablement et rapidement, les calculs demandés : il doit, ainsi, recouvrir chacun des modèles particuliers conçus par les élèves.

Pour masquer à l'élève l'activité importante et complexe de ce modèle programmé, il est nécessaire de pourvoir ce dernier d'un interface permettant des communications avec le système qui soient commodes et naturelles pour l'élève. A cet effet, l'interface doit être tel, que les échanges de l'élève avec l'ordinateur se fassent au niveau du modèle conçu par l'élève et non à celui du modèle potentiel programmé : une requête de l'élève doit, alors, représenter une étape élémentaire de son raisonnement et non une étape de travail de l'ordinateur, comme c'est le cas avec les langages de programmation.

L'ensemble système-élève peut donc être exprimé par le schéma de la figure 6.

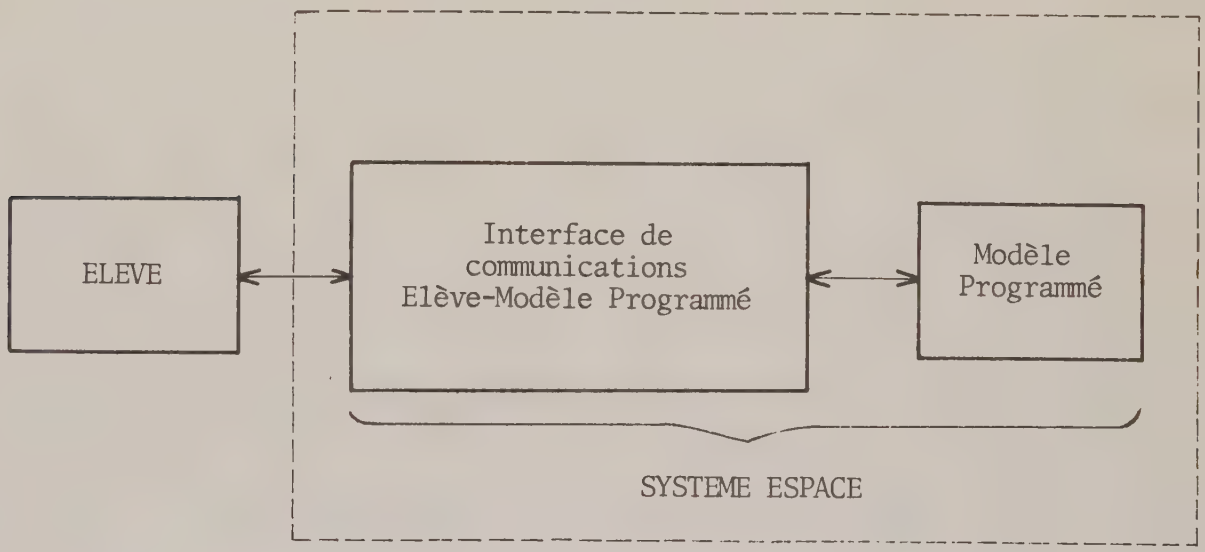


FIGURE 6

Le système ESPACE consistera en un ensemble de sous-systèmes (37) représentant chacun le modèle potentiel d'un type de machine électrique. Nous essayerons d'établir des principes généraux conduisant à l'élaboration de chacun de ces sous-systèmes et permettant de satisfaire, au mieux, outre les impératifs pédagogiques,

certains objectifs pratiques, dont les plus importants sont les suivants ((38), (39)) :

1°) Indépendance maximum du système par rapport à l'ordinateur,

2°) Facilité de modifications dans un sous-système,

3°) Assistance efficace à la création d'un nouveau sous-système,

4°) Organisation identique pour chacun des sous-systèmes,

5°) Coût raisonnable d'utilisation du système.

A cette fin, la réalisation d'un modèle potentiel, qui doit être nécessairement de taille finie et pourtant capable de s'adapter à un nombre infini de cas, sera directement issue de la notion de projet fermé, à savoir, comme nous l'avons vu au chapitre 1 de la première partie, qu'un ensemble fini et connu, de types d'éléments pouvant être reliés par un nombre fini de types de liaisons, permet de décrire toutes les réalisations possibles d'un tel projet ; alors, un nombre fini d'algorithmes élémentaires, assemblés différemment suivant la réalisation conçue, permettent de faire face à un nombre quasi infini de situations.

Un modèle potentiel sera caractérisé par ((17), (41)) :

1°) La nature des informations prévues concernant le type de machine électrique considérée et leur représentation dans les mémoires de l'ordinateur.

2°) Les algorithmes qui leur sont appliqués et leur décomposition.

Dans le même but, nous développerons des formes de communications aussi complètes et générales que possible et nous essayerons de donner à l'ensemble de nos programmes, une organisation modulaire et efficace, qui soit compatible avec l'utilisation qui sera faite du système.

CHAPITRE 2 - LE MODELE POTENTIEL

A - LES INFORMATIONS ET LEUR REPRESENTATION DANS LES MEMOIRES DE L'ORDINATEUR ((1), (11), (17), (18), (20), (25), (26), (29), (36), (40), (47))

I - INTRODUCTION A LA STRUCTURATION DES INFORMATIONS

Pour ne pas ajouter de contrainte supplémentaire et inutile à l'élève, il est nécessaire que ce dernier puisse décrire au système la construction de son projet, dans l'ordre qui lui convient.

Par ailleurs, les algorithmes de calcul doivent être capables d'exploiter rapidement cette description.

Ainsi, la représentation des informations doit être plus que leur simple agglomération dans les mémoires de l'ordinateur. Elle doit satisfaire, aussi, les deux impératifs suivants (17) :

1°) Elle doit être susceptible d'expansion et de modifications dynamiques,

2°) Afin de récupérer une information particulière, il ne doit pas être nécessaire de faire une recherche séquentielle sur toute la représentation.

Nous devons donc élaborer une méthode très générale et efficace de mémorisation et de manipulation d'un ensemble complexe d'informations provenant de l'élève. Cette méthode doit nous permettre de "modeler" des objets dans les mémoires de l'ordinateur et de ce fait, doit être adaptée à la notion d'élément d'un système et de liaisons entre ces éléments.

Ces considérations nous conduisent à donner une forme structurée aux informations.

Mais, avant de décrire la structuration des informations que nous avons adoptée, il est nécessaire de distinguer sa partie sémantique de sa partie implantation dans les mémoires de l'ordinateur :

- la première ne représente que l'esprit dans lequel les informations sont structurées et représentées en mémoire, afin d'être compatible avec la dynamique nécessaire du modèle. Elle est générale, indépendante de l'ordinateur et du langage de programmation.

- la seconde est la représentation effective des informations dans les mémoires de l'ordinateur. Elle dépend de ce dernier et du langage de programmation utilisé.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons, essentiellement, à l'aspect sémantique de la structuration des informations.

II - PRINCIPES DE LA STRUCTURATION DES INFORMATIONS

Le concept de base de cette structuration est l'entité que nous définissons comme étant un groupe de plusieurs composantes servant à caractériser un même type d'objet. L'entité n'a aucune représentation réelle dans les mémoires de l'ordinateur. Elle constitue, en fait, la prévision au niveau de sous-programmes, de l'existence effective d'un ou plusieurs objets dont le type est symbolisé par l'entité. Cette existence sera matérialisée par la présence en mémoire d'une ou plusieurs réalisations de l'entité. Ces réalisations seront créées par des sous-programmes en fonction du modèle abstrait de l'entité correspondante. Elles sont représentées dans l'ordinateur, sous forme de blocs de plusieurs mots de mémoire contigus.

Les composantes d'une entité sont alors la prévision d'informations concernant l'objet associé à l'entité et ne peuvent prendre

de valeurs effectives que dans les réalisations de l'entité. Nous distinguerons deux sortes de composantes :

1°) Les composantes caractéristiques. Elles réunissent les propriétés spécifiques de l'objet dont le type est symbolisé par l'entité. Leurs valeurs effectives, dans une réalisation, caractérisent l'objet représentée par la réalisation. Elles peuvent être, soit des caractéristiques de construction, soit des caractéristiques de fonctionnement.

2°) Les composantes pointeurs. Elles constituent l'élément d'information nécessaire qui, à partir d'une réalisation d'entité, permet de retrouver, dans les mémoires de l'ordinateur, une autre réalisation. Ainsi, plusieurs réalisations peuvent être reliées entre elles par des pointeurs et constituer une structure de réalisations.

Une telle structuration satisfait assez bien aux impératifs énoncés précédemment et nous permet de représenter, dans les mémoires de l'ordinateur, un ensemble d'objets reliés entre eux par des relations. Nous devons examiner comment elle peut être appliquée efficacement à la représentation des machines électriques.

III - APPLICATION DE CETTE STRUCTURATION A LA REPRESENTATION D'UNE MACHINE ELECTRIQUE

III - 1 - Représentation des éléments d'un projet

Les éléments constituant une machine électrique qui sont les plus naturellement appréhendés par l'élève (ou l'ingénieur) sont ceux qui se distinguent de leur environnement par des discontinuités physiques ; ce sont les composants de la machine, tels que le circuit magnétique ou les bobinages.

Chaque composant d'une machine électrique est un objet dont nous pouvons symboliser le type par une entité, mettant, ainsi, à la disposition de l'élève, les éléments de construction de projet les plus naturels pour lui. Lorsque l'élève utilisera un composant, une réalisation de l'entité correspondante devra être créée en mémoire. D'autre part, pour que l'élève puisse faire, aisément, référence à ce composant, il devra lui donner un nom. Dans ce but, le système maintient à jour une table des noms avec l'adresse des réalisations correspondantes. Un sous-programme du système utilisant une technique de "hash coding" ou de dichotomie, permet une recherche rapide, dans cette table.

III - 2 - Représentation des relations entre composants

Nous pouvons prévoir des relations entre les composants, en définissant, au niveau des entités correspondantes, des composantes pointeurs. Cela ne constitue, en fait, que la définition partielle de relations potentielles ; en effet, il n'est pas possible de traduire, complètement, sur cette représentation, toutes les contraintes de type électrotechnique, qui s'appliquent à ces relations. Ces contraintes ne sont complètement spécifiées qu'avec l'écriture de sous-programmes de création des liaisons.

Par l'intermédiaire des communications, l'élève présentera ses requêtes au système et développera, ainsi, une structure de réalisations spécifiques de l'état de son projet et dont il ignorera la complexité.

Conformément aux aspects hiérarchisés et associatifs de la conception d'un projet de machine électrique, nous distinguerons deux types de relations entre les composants d'une machine électrique :

1°) Les relations hiérarchiques,

2°) Les relations associatives.

Nous allons étudier chacun de ces types de relations.

III - 3 - Les relations hiérarchiques

Comme nous l'avons déjà vu, un projet de machine électrique s'élabore partie par partie. Ainsi, la conception d'un composant de machine électrique est, en fait, une partie du projet complet. En conséquence, un composant peut, lui-même être constitué par d'autres composants. Cette récursivité nous conduit à réaliser une décomposition hiérarchique de la machine électrique considérée en types de composants possibles (figure 7).

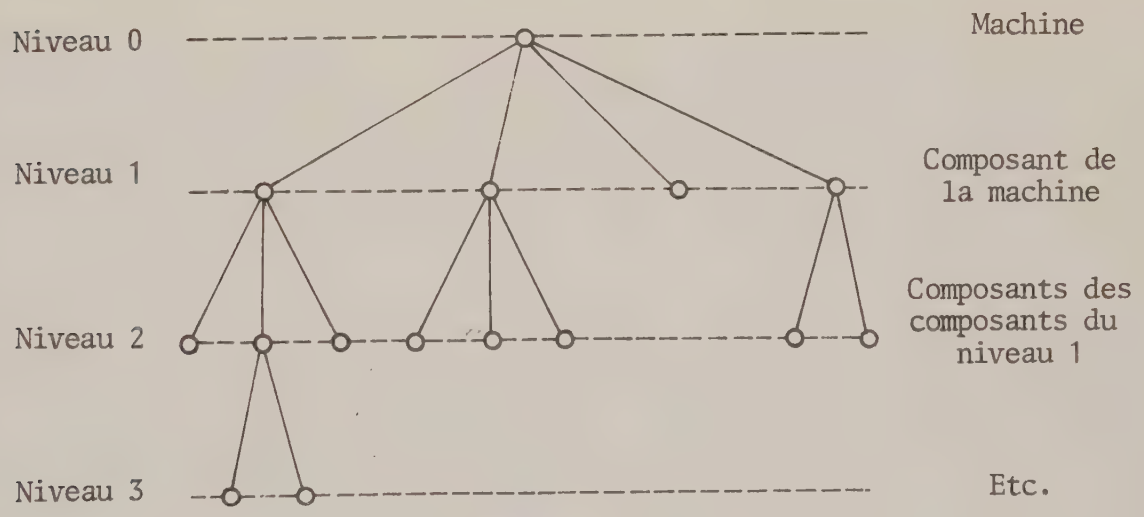


FIGURE 7

Le sommet de la hiérarchie est la machine elle-même. Au niveau 1, se trouvent les composants de la machine les plus vastes possibles, permettant sa construction. Le niveau 2 contient les plus vastes composants des composants du niveau 1 , permettant leur construction, etc... Les composants situés aux extrémités des branches de la hiérarchie, caractérisent les détails de la description de la machine, accessibles lors de l'utilisation du système.

Les composants ainsi déterminés, sont ceux que nous symbolisons par des entités. Les liaisons hiérarchiques possibles entre eux

sont définies par les arcs de la hiérarchie précédente, à savoir : un composant situé au niveau n de la hiérarchie ne peut être contenu que par un composant du niveau n - 1 (relation hiérarchique vers le haut) et ne peut contenir que des composants du niveau n + 1 (relation hiérarchique vers le bas).

Ces relations permettrons d'indiquer sur la structure des réalisations, conformément aux requêtes de l'élève, quels sont les composants participant à la construction d'un composant plus vaste.

III - 4 - Les relations associatives

Les relations hiérarchiques précédentes ne suffisent pas à définir complètement la construction d'un composant. Il est en plus nécessaire de préciser le mode d'assemblage des composants intervenant dans cette construction. Les relations associatives sont utilisées à cette fin.

Ces relations sont soumises aux règles de la construction du matériel électrique que nous exprimons, dans notre modèle potentiel, au niveau des sous-programmes permettant de créer les liaisons correspondantes entre les réalisations d'entités.

III - 5 - Reproduction d'un composant et de sa description

Les relations hiérarchiques vers le bas issues, directement ou non, d'un composant dans la structure des réalisations définissent une hiérarchie associée au composant.

Nous distinguerons deux classes de relations associatives concernant cette hiérarchie :

1°) Les relations internes à la hiérarchie, qui relient deux composants appartenant à la hiérarchie.

2°) Les relations externes à la hiérarchie, qui relient un composant appartenant à la hiérarchie à un composant ne lui appartenant pas.

La hiérarchie munie des relations internes complète la description spécifique du composant faite à l'aide des composantes caractéristiques de la réalisation le représentant. Un composant et sa description constituent une partie de la machine élaborée par l'élève. Les relations externes caractérisent les liaisons de cette partie de la machine avec les autres parties.

Il peut être commode dans certains cas, de simuler, à travers le système, la génération d'un nombre quelconque de composants identiques. Il s'agit alors, pour l'élève, d'obtenir du système la reproduction de parties de son projet ; cependant, pour sa part, le système devra prendre en considération la duplication d'un composant et sa hiérarchie.

Aux deux types de caractéristiques possible d'un composant (de construction et de fonctionnement), nous pouvons associer deux définitions différentes de l'identicité de deux parties de projet :

1°) Deux parties de projet sont identiques si toutes les composantes autres que celles servant à représenter les relations externes sont égales deux à deux, et cela, pour tous les composants constituant les deux parties de projet considérées.

2°) Deux parties de projet sont identiques si toutes les composantes précédentes autres que celles représentant des caractéristiques de fonctionnement sont égales deux à deux.

A une méthode générale de reproduction susceptible de satisfaire les deux définitions précédentes, mais qui ne soit pas toujours commode pour l'utilisateur du système, nous avons préféré une solution plus particulière qui nous paraît satisfaisante dans le cadre de la conception des machines électriques. En effet, les caractéristiques de fonctionnement nécessaires au calcul d'un projet de machine électrique sont, dans la plupart des cas pratiques, égales pour deux composants de constructions identiques. Cela nous conduit à adopter la première des définitions ci-dessus.

Alors, un type de composant, susceptible d'être reproduit avec sa description, est symbolisé par deux entités au lieu d'une :

- la première regroupe les composantes pointeurs correspondant aux relations hiérarchiques vers le haut et aux relations associatives prévues pour le composant.

- la deuxième contient toutes les composantes caractéristiques et toutes les composantes pointeurs correspondant aux relations hiérarchiques vers le bas.

Lorsque l'élève demande au système de reproduire un composant il suffit de ne créer en mémoire qu'une nouvelle réalisation de la première des deux entités. La définition, dans cette entité, d'une composante pointeur supplémentaire permet d'indiquer dans ses réalisations, à quelle réalisation de la deuxième entité se référer pour obtenir la description du composant (figure 8).

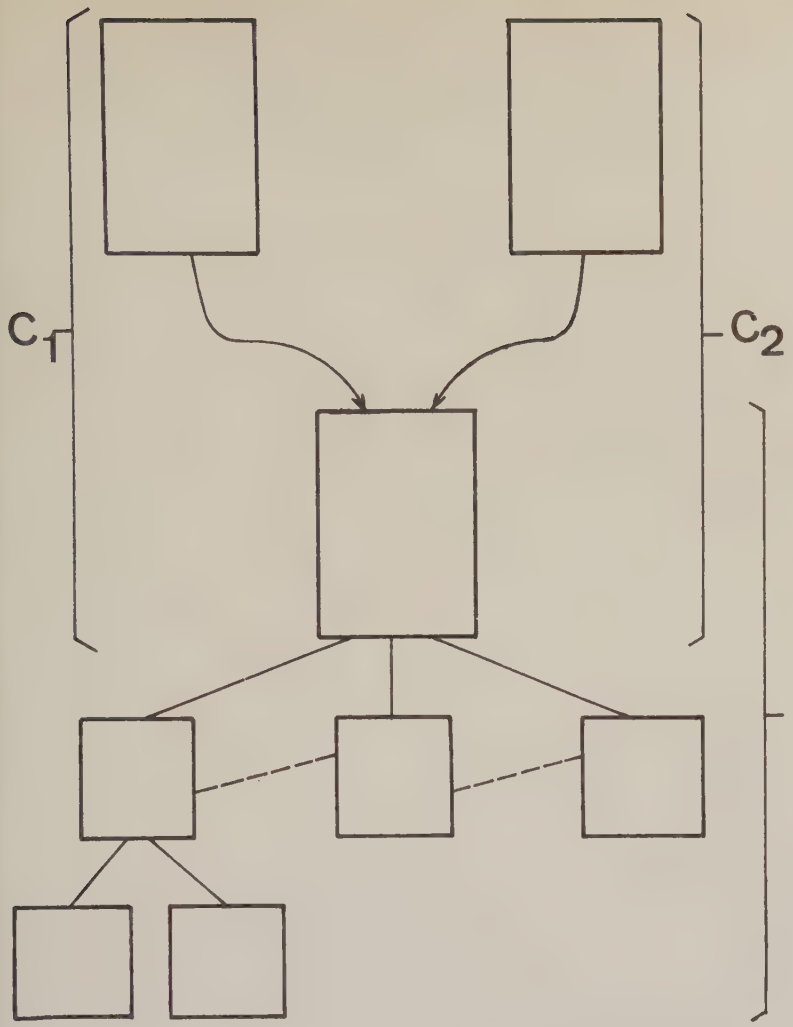


FIGURE 8

Représentation de deux composants C1 et C2 identiques.

Réalisations d'entités constituant la description commune aux deux composants C1 et C2.

——— Liaison hiérarchique.

----- Liaison associative interne.

Toute modification apportée à la description commune aux deux composants affecte alors les deux composants.

Cette solution est commode pour l'élève car :

1°) Elle lui permet de ne décrire qu'une seule fois l'un des composants C1 ou C2 ;

2°) Deux composants identiques le restent dans le temps car il n'y a pas véritablement reproduction en mémoire ;

3°) Les calculs n'ont besoin d'être effectués que pour l'un des deux composants.

Au point de vue pratique, il y a un gain évident de place en mémoire.

Cependant cette solution, outre le manque de généralité vu précédemment, ne peut être utilisée que si la hiérarchie associée au composant ne peut pas avoir de relations externes autres que celles issues de son sommet. En effet, ces relations, précisant la place du composant dans le projet, ne sont pas en principe communes à deux composants identiques.

III - 6 - Quelques remarques sur cette structuration des informations

III - 6 - 1 - Une caractéristique d'un composant peut être dans certains cas une fonction d'un ou plusieurs paramètres. Alors, il n'est pas possible de la représenter simplement. Nous devons imaginer une entité de type "point" dont les réalisations serviront à représenter la fonction point par point. Pour cela, une réalisation de l'entité point doit contenir une valeur de la fonction à représenter et les valeurs associées des paramètres. Les réalisations de l'entité point servant à représenter une même fonction doivent être chaînées entre elles par des liaisons.

D'une manière plus générale, il est toujours possible de définir des entités autres que celles déjà vues et qui soient utilisables par le système. Les relations possibles correspondantes ne sont pas, alors, d'un type déjà examiné et doivent être étudiées en particulier.

III - 6 - 2 - Il y a plusieurs représentations possibles d'une même liaison dans les mémoires de l'ordinateur.

Soit la relation : "l'ensemble S contient les éléments P1 et P2". Elle peut être représentée entre autres solutions par (figure 9).

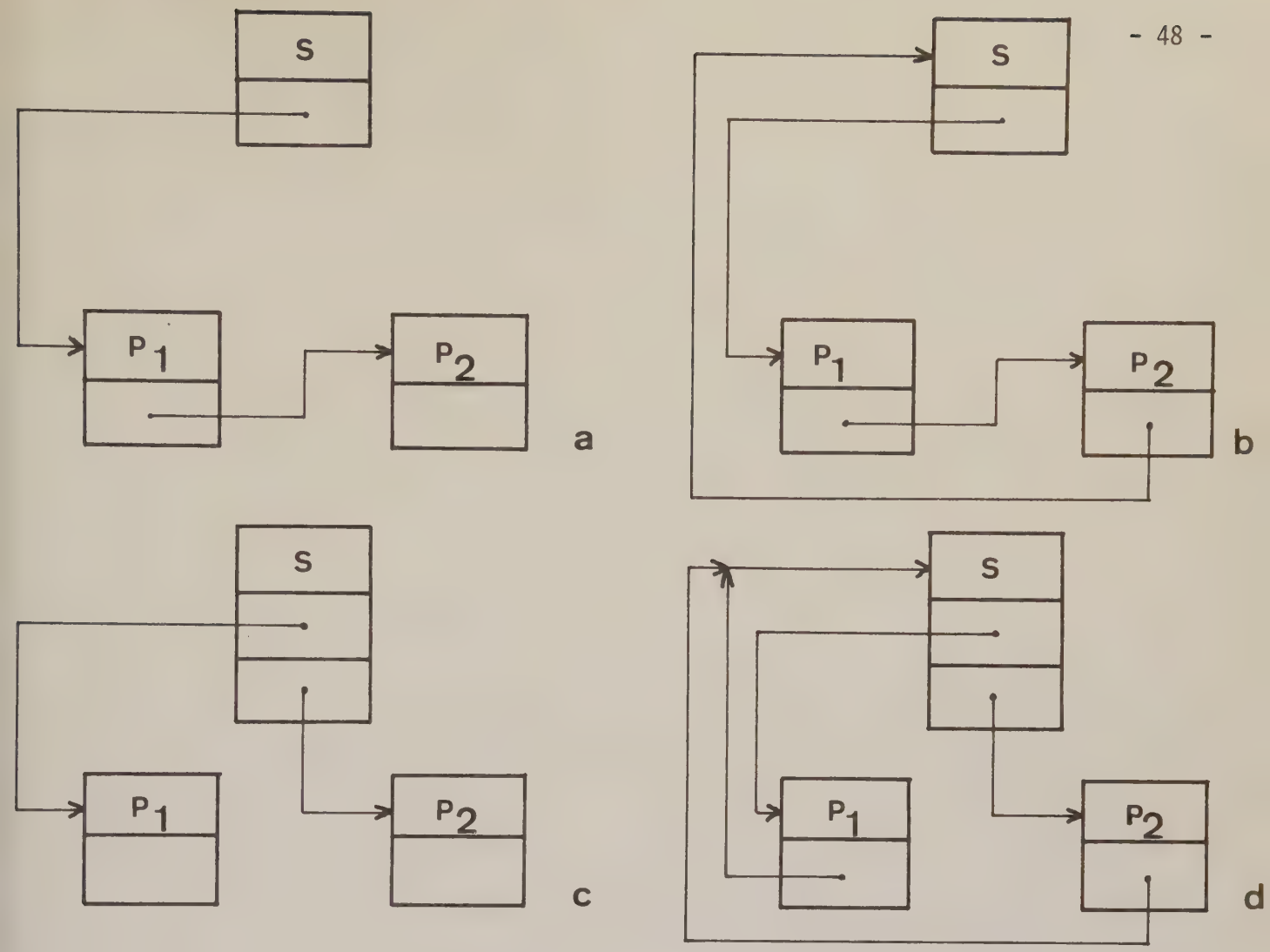


FIGURE 9

Les solutions (a) et (c) représentent la relation dans un sens seulement : connaissant l'ensemble S, il est possible d'en connaître les éléments. Mais l'inverse n'est pas possible.

Les solutions (b) et (d) représentent la relation dans les deux sens.

Dans les solutions (c) et (d), le nombre des composantes pointeurs d'une réalisation de l'entité "ensemble" est variable en fonction du nombre d'éléments contenus. Mais alors, depuis la réalisation de l'entité "ensemble" on a un accés direct à chacune des réalisations de l'entité "élément".

La représentation d'une liaison sera choisie en fonction des critères suivants :

1°) Minimisation de la place en mémoire,

2°) Rapidité d'exploitation,

3°) Facilité de la gestion de la structure des réalisations.

Ces critères étant souvent contradictoires, la solution dépend de la liaison particulière considérée. Par exemple, il paraît préférable de représenter une relation hiérarchique dans les deux sens (vers le haut et vers le bas).

IV - CONCLUSION

Les considérations qui précèdent permettent théoriquement de décrire de manière précise une machine électrique dans ses moindres détails.

On peut remarquer que si ce mode de structuration n'est pas obligatoirement la seule voie possible de description des machines électriques, il présente, d'un point de vue pratique, l'intérêt indéniable de permettre une recherche directe des informations sur les composants. De plus, il est relativement aisé d'implanter, sur ce mode de description, une technique de modification dynamique de la structure des réalisations en mémoire.

Enfin, il est possible d'étendre ces principes à la description de la plupart des systèmes physiques (machines électriques, mécaniques, hydrauliques, ...).

B - LES ALGORITHMES ET LEUR COMPOSITION (38),(39),(40),(41).

I - INTRODUCTION

Chaque requête de l'élève constitue une étape de son raisonnement et correspond à une action du système nécessitant l'exécution d'un algorithme complexe (ou molécule) qui peut être considéré comme la composition de plusieurs algorithmes de base (ou atomes) ((40), (41)). La "compréhension" par le système d'une requête de l'élève est donc équivalente à l'auto-assemblage convenable des algorithmes de base afin de former un algorithme plus complexe dont l'exécution satisfera la requête.

Le problème est donc de déterminer pour le modèle potentiel :

1°) Quels sont les algorithmes de base qu'il doit contenir,

2°) Comment donner à ces algorithmes les moyens de s'assembler pour satisfaire une requête de l'élève.

Outre le fait qu'ils ne doivent pas imposer à l'élève d'autres exigences que celles relatives aux principes de construction de la machine, ces algorithmes doivent satisfaire, en plus, les deux impératifs généraux suivants :

1°) Ils doivent être en nombre fini,

2°) Ils doivent être généraux pour pouvoir s'appliquer à toutes les structures de réalisations pouvant être développées.

De plus, nous distinguerons deux classes d'algorithmes de base. Ce sont :

1°) Les algorithmes de gestion de la structure,

2°) Les algorithmes de calcul.

L'ensemble des algorithmes de base définit complètement le domaine de compréhension (ou domaine sémantique) et d'action du système.

II - GENERALITES DES ALGORITHMES DE BASE

La structuration des informations définie précédemment permet le développement d'une quasi-infinité de structures de réalisations différentes. Un algorithme ne peut donc pas être général s'il s'applique globalement à toute la structure des réalisations. Mais il est toujours possible de concevoir un algorithme de base qui soit général en le définissant à la limite au niveau d'une entité et de celles qui lui sont directement liées par des relations potentielles, car ces dernières sont en nombre fini. Les algorithmes constitués par l'assemblage, en fonction de la structure des réalisations, de plusieurs de ces algorithmes de base peuvent alors s'appliquer à tous les cas particuliers de structure.

III - LES ALGORITHMES DE GESTION

Ils effectuent, sur la représentation en mémoire des réalisations, les opérations de base suivantes :

- Création d'une réalisation,
- Mise à jour d'une composante caractéristique,
- Mise à jour d'une composante pointeur,
- Interrogation d'une composante,
- Suppression d'une réalisation,

- Effacement d'une composante,
- Vérification des principes de constructions de la machine.

En raison de la nature fermée des projets de machines électriques, les algorithmes de base et en particulier, ceux de vérifications des principes de construction, sont en nombre fini.

La composition de ces algorithmes de base doit permettre de satisfaire toutes les requêtes de l'élève demandant :

- La création d'un composant,
- L'entrée de la valeur d'une caractéristique d'un composant,
- La création d'une relation entre deux composants,
- La sortie de la valeur d'une caractéristique,
- L'interrogation des relations entre un composant et les autres composants,
- La suppression d'une relation,
- L'identification de deux composants.

IV - LES ALGORITHMES DE CALCUL

Ces algorithmes posent un problème particulier. En effet, les relations théoriques et empiriques qui existent entre les caractéristiques d'une machine font que ces dernières ne sont pas indépendantes. De ce fait, lors d'un calcul, un ensemble de caractéristiques indépendantes doit être considéré, à la fois par le système et par l'élève, comme hypothèse, toutes les autres caractéristiques en étant alors les conséquences directes ou non. Cela correspond, dans le processus de conception d'un projet, à l'étape d'évaluation des conséquences d'hypothèses établies par l'élève.

Il peut y avoir, cependant, plusieurs manières de choisir l'ensemble des caractéristiques constituant les hypothèses. Pour chaque type de machine électrique, il faut choisir au niveau de la définition des entités, l'ensemble des caractéristiques hypothèses qui, tout en étant le plus adapté à la conception d'un projet, reste, dans la mesure du possible, indépendant de la structure des réalisations développée. En effet, il est plus commode pour l'élève de disposer avec chaque type de composant, d'un jeu unique d'hypothèses, dont il doit indiquer les valeurs au système avant de faire effectuer les calculs, qui soit fixe quelque soit l'état de son projet.

Un algorithme de base est alors le calcul d'une caractéristique conséquence à partir d'autres caractéristiques conséquences et de caractéristiques hypothèses. La composition de plusieurs de ces algorithmes doit permettre le calcul de n'importe quelle caractéristique conséquence en fonction des caractéristiques hypothèses uniquement. Il existe donc plusieurs niveaux de conséquences pour les caractéristiques calculées par le système ; les caractéristiques intermédiaires calculées par le système constituent la trace du calcul de la caractéristique finale.

De plus, le système doit toujours effectuer le calcul d'une caractéristique conséquence, uniquement à partir des hypothèses car nous n'avons pas encore prévu la conservation simple de la trace des modifications apportées par l'élève entre deux calculs identiques.

Comme pour les algorithmes de gestion, parce que le projet d'une machine électrique est un projet fermé, le nombre des algorithmes de base de calcul est fini.

Les requêtes de calcul de l'élève peuvent être de deux sortes :

1°) Calcul simple d'une caractéristique d'un composant,

2°) Variation d'une caractéristique conséquence en fonction de la variation d'une caractéristique hypothèse.

Nous devons remarquer qu'en raison de la nature des problèmes de type 2, nous ne pouvons pas prévoir au niveau du modèle potentiel, les calculs qui seront utiles à l'élève lors de la prédétermination ou de la modification des hypothèses. Le choix de ces calculs est entièrement dépendant de l'élève et c'est donc à ce dernier de les effectuer.

V - COMPOSITION DES ALGORITHMES ((38), (39))

Nous devons composer les algorithmes en fonction du raisonnement de l'élève ayant conduit à la requête à satisfaire. Or, ce raisonnement est caractérisé par trois informations connues du système qui sont :

1°) La requête de l'élève,

2°) La structure des réalisations,

3°) Les valeurs des caractéristiques dans les réalisations.

L'assemblage des algorithmes se fera donc en fonction de ces trois informations, auxquelles correspondent les deux niveaux de composition suivants :

1°) L'analyse de la requête par l'interface de communications,

2°) L'examen de la structure des réalisations.

Par ailleurs, la composition des algorithmes doit satisfaire l'impératif suivant : en cas d'erreur de la part de l'élève, aucune modification ne doit être faite dans la structure des réalisations.

La conséquence immédiate est que toute action du système en vue de satisfaire une requête de l'élève doit être précédée d'un contrôle de la possibilité de cette action. La détection d'une erreur lors de ce contrôle interdit l'action correspondante.

D'une manière générale, nous essayons de détecter le maximum d'erreurs possibles lors d'un contrôle. Dans ce but, nous distinguons les deux types d'erreurs suivants :

1°) Celles concernant les relations entre composants,

2°) Celles concernant les valeurs des caractéristiques d'un composant.

En effet, alors qu'une erreur du deuxième type n'empêche pas la poursuite des vérifications, une erreur du premier type peut l'arrêter partiellement et même, parfois, totalement.

Remarquons toutefois que dans le cas des requêtes de calcul, certaines erreurs ne peuvent être détectées qu'après calcul. Le calcul est alors immédiatement arrêté. Mais cela ne conduit à aucun contre sens, car, comme nous l'avons vu, les calculs sont toujours refaits uniquement à partir des hypothèses.

Sachant qu'un modèle potentiel sera essentiellement programmé dans un langage évolué, nous avons prévu les trois méthodes suivantes pour réaliser la composition des algorithmes de base :

1°) Par réunion des algorithmes de base au sein d'une même procédure,

2°) Par utilisation de l'instruction CALL (au sens PL/1 ou FORTRAN) d'appel de procédure,

3°) Par l'intermédiaire d'une pile à deux colonnes, où la

première contient les codes d'algorithmes à exécuter, et le deuxième l'adresse de la réalisation à laquelle elle doit s'appliquer, et d'un programme exécutif capable d'utiliser cette pile.

Nous donnons plus de détails sur l'utilisation simultanée de ces trois méthodes, ainsi que sur leurs avantages et leurs inconvénients respectifs, dans l'annexe A.

VI - CONCLUSION

Nous devons remarquer que l'ensemble des algorithmes de base définit complètement les domaines de compréhension (ou domaine sémantique) et d'action du système (41).

Mais, la programmation des algorithmes d'un modèle potentiel nécessite un travail complexe de planification comprenant principalement :

1°) La détermination des hypothèses de calcul,

2°) La reconnaissance des algorithmes de base,

3°) Les choix des modes de composition utilisés lors de la programmation du modèle.

Le succès pédagogique de l'utilisation du système dépend considérablement de la qualité de cette planification.

CHAPITRE 3 - INTERFACE DE COMMUNICATIONS DU SYSTEME ESPACE

((22), (36), (38), (39), (44), (48))

I - INTRODUCTION

Le rôle de l'interface de communications est de masquer, à l'élève, la complexité du modèle potentiel programmé, afin de lui permettre de se consacrer, uniquement, à la conception de son projet. Cet interface constitue la seule partie du système directement utilisée par l'élève et de ce fait, il doit satisfaire au mieux les fondements pédagogiques du système. Il doit offrir à l'utilisateur, les moyens de communications les plus naturels et les plus commodes.

Dans le sens élève-ordinateur, cet interface est responsable de la transmission des requêtes formulées par l'élève à l'ordinateur. Ces requêtes, qui constituent les étapes du raisonnement de l'étudiant, doivent être présentées, par ce dernier, à l'ordinateur, en utilisant une terminologie électrotechnique, identique à celle qu'utiliserait deux ingénieurs, pour communiquer entre eux.

Par ailleurs, nous avons vu qu'il est, pédagogiquement, intéressant que l'élève puisse rajouter, momentanément, au système, sa propre programmation. Cependant, nous devons lui donner les moyens de réaliser cette programmation indépendamment du système ESPACE.

Dans le sens ordinateur-élève, les messages et les résultats doivent être transmis de la façon la plus claire possible, pour l'élève. Mais, la forme de présentation par l'ordinateur, des résultats, dépend de la nature de ces derniers.

Enfin, pour apporter plus de souplesse à ces communications, nous mettons à la disposition de l'élève, différents types de termi-

naux et, en particulier, un télétype, une console à écran de visualisation alphanumérique et une console à écran de visualisation graphique.

II - LES COMMUNICATIONS DANS LE SENS ELEVE-ORDINATEUR

II - 1 - Le langage de commandes ((22), (38), (39), (48))

Pour que l'élève puisse présenter commodément ses requêtes à l'ordinateur, il nous est apparu nécessaire de mettre à sa disposition, un langage satisfaisant au mieux les critères suivants :

1°) Il doit être appris très rapidement par l'élève,

2°) Il doit être d'utilisation naturelle, simple et rapide,

3°) Il ne doit pas limiter les possibilités offertes par le modèle potentiel.

Dans ce but, nous avons choisi un langage de commandes dont nous détaillons, ci-après, les principales caractéristiques.

Une commande débute toujours par un nom de commande, représentatif de l'action associée. Ce nom de commande peut être suivi par des modificateurs de la commande, des mots ignorables et des paramètres.

Un modificateur de commande est un mot qui, apparaissant après le nom de commande, indique le choix d'une option particulière associée à la commande. Les modificateurs permettent de donner une structure d'arbre aux commandes du langage. Chaque chemin de l'arbre représente un sens différent de la commande et ainsi, correspond à une action différente du système. Les modificateurs permettent de diminuer le nombre de commandes nécessaires en augmentant leur efficacité.

Les mots ignorables sont des modificateurs particuliers, en ce sens qu'ils ne correspondent pas à une modification du sens de la commande, mais permettent d'en améliorer la présentation. Un mot ignorable est facultatif pour l'utilisateur.

Les paramètres de la commande constituent les informations fournies par l'élève au modèle potentiel. Ils peuvent être de trois types : entier, réel ou alphanumérique.

Les mots clés du langage sont constitués par les noms des commandes, les modificateurs et les mots ignorables. Afin de permettre une utilisation plus rapide du langage, une abréviation minimale constante, constituée par les n premières lettres de chacun d'eux, est autorisée. Nous pensons que n = 3 est l'abréviation la plus commode. D'autre part, les mots clés ne sont pas réservés car nous évitons, lors de la définition du langage, la seule possibilité d'ambiguité, qui pourrait se produire si, dans une commande, un mot ignorable pouvait être suivi d'un paramètre alphanumérique.

Avec cette restriction, nous pouvons schématiser la forme générale d'une commande, par l'expression suivante :

nom de commande ((modificateur)* (mot ignorable)*(paramètre))*;

(où * = 0, 1, 2, ...)

ou par la représentation de Backus :

<commande> : = <nom de commande> <corps de commande>
<corps de commande> : = <mot clé> <corps de commande>
<corps de commande> : = <;>
<mot clé> : = <modificateur>
<mot clé> : = <mot ignorable>
<mot clé> : = <paramètre>

Notons que le ";" sert à délimiter la commande.

Nous autorisons, de plus, l'emploi de commentaires permettant à l'élève d'insérer des indications concernant son travail. Ces commentaires peuvent être placés n'importe où dans une commande ou entre deux commandes.

L'analyse de ce langage est faite par un interpréteur. Elle comporte d'abord une analyse lexicographique des noms de commande, modificateurs et mots ignorables. Cette analyse est réalisée en utilisant une méthode de recherche dans la table des mots clés par dichotomie. Elle est suivie par une analyse syntaxique qui vérifie que la commande limitée par le ";" correspond bien à l'une des branches de l'arbre associé au nom de commande. Si les deux analyses précédentes sont correctes, l'interpréteur enregistre les paramètres de la commande dans une zone de mémoire de travail commune à l'interpréteur et au programme exécutif en lui transmettant la pile remplie avec les codes des algorithmes associés à la branche reconnue de la commande. Ainsi, l'interpréteur permet une première composition des algorithmes.

Pour notre type d'application, l'élève doit pouvoir communiquer avec l'ordinateur dans un environnement intéractif, lui permettant :

- d'envoyer une commande,
- d'étudier les résultats,
- de préparer la prochaine requête, en fonction de ces derniers.

L'utilisation du système ESPACE, sous un système d'exploitation en temps partagé de l'ordinateur semble donc préférable, mais cela n'exclut pas, automatiquement, le batch processing, pour les programmes dont l'exécution est trop longue. Aussi, l'interpréteur a-t-il été réalisé pour pouvoir travailler dans ces deux modes d'exploitation de l'ordinateur.

D'autre part, il nous semble intéressant que l'élève puisse préparer son travail en perforant, sur cartes, à l'avance, un certain nombre de commandes. Nous autorisons, dans le système, l'exécution, à partir du terminal de travail, d'un ensemble non limité de commandes pré-enregistrées sur disque. En cas d'erreur à l'interprétation ou à l'exécution d'une commande, l'exécution des commandes suivantes est arrêtée.

II - 2 - Insertion dans le système d'un programme de l'élève

L'élève doit pouvoir réaliser sa programmation indépendamment du système. Cependant, nous lui imposerons le langage de programmation qui sera, à l'avenir, FORTRAN.

Pour ce faire, nous lui fournissons un ensemble de procédures qui lui permettent d'affecter aux identificateurs qu'il a choisi, les valeurs de certaines caractéristiques de son projet. Ces procédures ont pour rôle de rechercher les valeurs nécessaires dans la structure des réalisations et sont composées d'algorithme de base de gestion de la structure.

Nous donnons à l'élève la double possibilité suivante :

1°) D'intégrer sa programmation au système,

2°) D'exécuter sa programmation à part.

Dans le premier cas, une commande du langage réservée à cet effet, permet à l'élève de lancer, à n'importe quel moment de l'utilisation du système et aussi souvent qu'il le désire, l'exécution de son programme.

Dans le deuxième cas, nous fournissons à l'élève un programme dont le rôle est de récupérer, sur disque, les résultats concernant son projet, qui ont été, préalablement enregistrés. L'élève peut alors faire exécuter son programme quand il le désire, en dehors de l'utilisation du système. C'est le cas des programmes dont l'exécution est longue et qui, alors, doivent, de préférence, être exécutés en batch processing.

III - LES COMMUNICATIONS DANS LE SENS ORDINATEUR-ELEVE

III - 1 - Sorties alphanumériques

La réponse du système à une requête de l'élève peut être constituée par un ensemble de messages : messages d'erreurs, résultats de calcul, ... D'une manière générale, toute requête a, de la part du système, une réponse. D'autre part, les messages d'erreurs, pour ne pas être trop longs, sont codés. L'élève dispose d'une liste de codes d'erreurs.

Dans la version actuelle du système, les messages ne sont pas stockés en mémoire, mais immédiatement édités. Ils arrivent donc sur le terminal de travail avec l'ordre dans lequel ils sont rencontrés lors de l'exécution de la programmation.

Cette forme d'édition présente les inconvénients suivants :

1°) Les messages arrivent dans un ordre absolument indépendant de leur nature,

2°) Certains messages peuvent être édités plusieurs fois,

3°) Les possibilités de filtrer les messages sont minces.

Aucune souplesse de présentation des messages n'est donc prévue dans la version actuelle, à l'exception, cependant, de la pos-

sibilité que nous donnons à l'élève de demander ou non la trace des calculs.

Cependant, un nouveau programme d'édition a été préparé pour la prochaine version du système. Ce programme permet de stocker les messages, puis de les éditer en tenant, éventuellement, compte de priorités affectées aux messages, par les programmes du modèle potentiel.

Les principales possibilités d'édition offertes par ce programme sont les suivantes :

1°) Edition des messages stockés, à n'importe quel moment de l'exécution des programmes du modèle potentiel, par simple appel au programme d'édition. Il n'est donc pas absolument nécessaire de stocker tous les messages avant de commencer leur édition ;

2°) Edition dans l'ordre d'arrivée des messages ;

3°) Edition dans l'ordre des priorités ;

4°) Edition des seuls messages ayant une priorité supérieure à une priorité minimale déterminée, en fonction des requêtes de l'élève.

Ces possibilités, dans la mesure où elles ne sont pas contradictoires, peuvent être combinées.

Ainsi, grâce à ce programme, nous pouvons, lors de la détection d'erreurs, séparer les erreurs suivant les deux types déjà vus : erreurs de construction et erreurs sur les valeurs des caractéristiques des composants.

Par ailleurs, cela apporte plus de souplesse pour présenter les résultats d'un calcul en n'autorisant plus seulement toute la

trace des calculs, ou pas de trace du tout, mais aussi des traces partielles.

III - 2 - Sorties graphiques ((36), (44))

Nous avons vu, qu'en plus d'un calcul simple, l'élève peut aussi demander la variation d'une caractéristique conséquence en fonction de celle d'une caractéristique hypothèse. Bien qu'alors, il soit encore possible de présenter les résultats sous forme alphanumérique, nous offrons aussi à l'élève la possibilité de choisir une présentation graphique.

Ce type de sortie, visualisant clairement les intéractions entre les paramètres du projet, doit permettre une meilleure compréhension de la machine électrique par l'élève. D'autre part, nous pensons que cela doit l'inciter à essayer de réaliser une optimisation de son projet.

IV - CHOIX DES TERMINAUX

La commodité des communications de l'élève avec le système est pédagogiquement extrêmement importante. C'est la raison pour laquelle nous avons cherché à développer un jeu varié de moyens de communication. Mais nous pensons que ces communications ne posent pas seulement un problème de programmation, mais aussi un problème de choix de terminaux.

Nous donnons à l'élève la possibilité d'utiliser, principalement, les terminaux suivants :

1°) Un télétype. Ce terminal nous semble le plus adapté à l'utilisation "classique" du système. Ainsi, l'élève

peut conserver la trace de son travail, sur papier.

2°) Une console à écran de visualisation alphanumérique. Ce terminal semble, par contre, plus adapté à l'interrogation de banques de données de matériaux ou de projets industriels déjà réalisés. Une réalisation de ces banques de données existe, actuellement. Mais, conçue à l'aide du système SOCRATE (1), elle n'est pas intégrée au système ESPACE et ainsi, ne donne pas entière satisfaction. Cette réalisation va donc être reprise dans le but de l'intégrer, totalement, au système ESPACE.

3°) Une console à écran de visualisation graphique. Ce terminal est le plus adapté aux sorties graphiques. Le problème essentiel a été le choix d'un terminal de coût et de performance raisonnables. Nous avons adopté comme solution, un terminal à tube mémoire. Un ensemble réduit de programmes généraux de sorties graphiques a été spécialement réalisé pour la version actuelle du système ESPACE. Ces programmes sont aussi utilisables par l'élève pour réaliser sa propre programmation.

A l'exception des sorties graphiques qui nécessitent le terminal graphique, toutes les autres tâches peuvent être effectuées sur tous les terminaux. C'est à l'élève de choisir celui qu'il préfère, en fonction de son travail.

D'autre part, à condition que leur accés soit facile, pour l'élève, il pourrait être intéressant d'intégrer au système, l'utilisation de termianux tels qu'une imprimante rapide ou une table traçante.

CHAPITRE 4 - ORGANISATION DES PROGRAMMES DANS LE SYSTEME ESPACE

((8), (21), (22), (37), (38), (39), (43), (48), (49))

I - AIDE A LA REALISATION D'UN SOUS-SYSTEME PROPRE A UN TYPE DE MACHINE ELECTRIQUE

I - 1 - Introduction

Dans le but de réaliser un sous-système propre à un type de machine électrique, il est nécessaire d'effectuer un certain nombre d'opérations qui portent essentiellement sur :

1°) La planification du domaine d'action du sous-système,

2°) La définition du langage de commandes propre au sous-système,

3°) La définition de la structuration des informations,

4°) L'écriture des programmes exécutant les algorithmes de base.

Les trois dernières de ces opérations sont fondées sur les principes généraux décrits dans les deux précédents chapitres. Nous pouvons en déduire qu'une partie du travail à réaliser lors de ces trois opérations est à répéter pour chaque nouveau sous-système. Pour éviter ce travail répétitif, nous avons entrepris de munir le système ESPACE de programmes généraux utilisables par tous les sous-systèmes. En facilitant ainsi la tâche du programmeur d'un sous-système, nous lui permettons de se consacrer plus particulièrement à l'aspect pédagogique de l'élaboration d'un modèle potentiel et du langage de commandes associé.

I - 2 - Aide à la génération d'un langage de commandes

((48), (49))

Nous avons défini, dans le chapitre précédent, la structure générale des commandes du langage associé à chaque sous-système. Grâce à cette structure commune à toutes les commandes, un interpréteur unique (automate d'états finis déterministe) peut réaliser l'analyse de tous les langages de commandes du système ESPACE, à condition toutefois de travailler pour chacun de ces langages sur une représentation codée adéquate en mémoire des arbres représentatifs des commandes du langage.

Pour réaliser cette représentation du langage en mémoire, un programme spécial (dit générateur de langage de commandes) a été écrit. Associé à ce programme, un langage de commandes de même structure que précédemment (dit langage générateur) permet de décrire tout nouveau langage ayant cette structure. Le langage générateur, lui-même préalablement codé en mémoire, est analysé par l'interpréteur et ainsi, la représentation codée en mémoire d'un nouveau langage est réalisée par le programme générateur en fonction des commandes envoyées.

Le programme générateur apparaît comme un sous-système très particulier du système ESPACE. Il rend possible la modification d'un langage de commandes déjà existant sans remaniement de la programmation. D'autre part, grâce à lui, la génération d'un nouveau langage ne nécessite pas l'écriture d'un programme interpréteur spécial.

Un exemple de génération de langage est donné dans l'Annexe C.

L'ensemble interpréteur-générateur a été réalisé en projet d'année spéciale de Mathématiques Appliquées par Messieurs

Michel Campmas et Denis Husset. La génération du langage générateur, le codage des langages ainsi que l'utilisation de l'interpréteur et du générateur sont décrits dans le rapport de projet.

I - 3 - Autres types d'assistance apportées à la réalisation d'un sous-système

Dans la version actuelle, la seule assistance apportée par le système ESPACE à la réalisation d'un sous-système concerne la génération d'un langage. Cependant, nous avons prévu deux nouvelles possibilités d'assistances.

La première porte sur l'édition des messages et a déjà été discutée dans le chapitre sur l'interface de communications.

La seconde porte sur la représentation en mémoire de la structure des réalisations. Un programme général doit permettre au concepteur de sous-système de représenter facilement la structure de façon compacte dans un tableau à une seule dimension. Ce programme doit gérer, entre autre, l'emplacement des réalisations dans le tableau et la récupération de leur adresse (dichotomie) ainsi que la suppression des réalisations et le tassement de la structure (carbage collection). Ce programme est mis au point pour la prochaine version du système ESPACE.

II - STRUCTURE DE LA PROGRAMMATION ((38), (39))

Dans la version actuelle du système, le passage de contrôle d'un programme à un autre est toujours réalisé en utilisant l'instruction CALL (au sens PL/1 ou FORTRAN). Cela a été rendu possible car

nous n'avons pas été gêné par une taille de mémoire centrale trop restreinte.

En effet, ce type d'appel de programme (ou branchement direct) nécessite que le programme appelé soit en mémoire avant que ne se fasse l'appel et que l'adresse en mémoire du programme appelé soit connue par le programme appelant.

L'avantage de ce branchement de programme à programme est sa rapidité du fait que les mémoires secondaires ne sont pas utilisées lors de l'exécution des programmes et que les adresses de branchement sont déterminées à l'avance lors du chargement.

Cependant, dans le but de faciliter l'implantation de notre système sur un ordinateur de taille réduite, nous devons prévoir qu'il sera nécessaire de réaliser des branchements dynamiques entre programmes.

Lors d'un branchement dynamique, l'adresse du programme appelé n'est pas connue par le programme appelant. Le programme appelé peut même ne pas être en mémoire centrale. Il est donc nécessaire, lors d'un branchement dynamique, de charger éventuellement ce dernier programme en mémoire centrale et de lui passer le contrôle.

Ce type de branchement apporte plus de souplesse pour l'utilisation de la mémoire centrale, car à la limite, seuls les programmes nécessaires peuvent s'y trouver permettant ainsi de travailler avec une mémoire centrale de taille réduite. Cependant, le branchement dynamique est nécessairement beaucoup moins rapide que le branchement direct.

Pour cette dernière raison, nous avons donné à nos programmes, la possibilité d'avoir une structure de recouvrement de programme (overlay) qui, tout en n'imposant pas la présence en mé-

moire centrale de tous les programmes, permet des branchements entre programmes plus rapides que les branchements dynamiques précédents.

La structure d'overlay donnée à nos programmes est indiquée sur les figures 10 et 11.

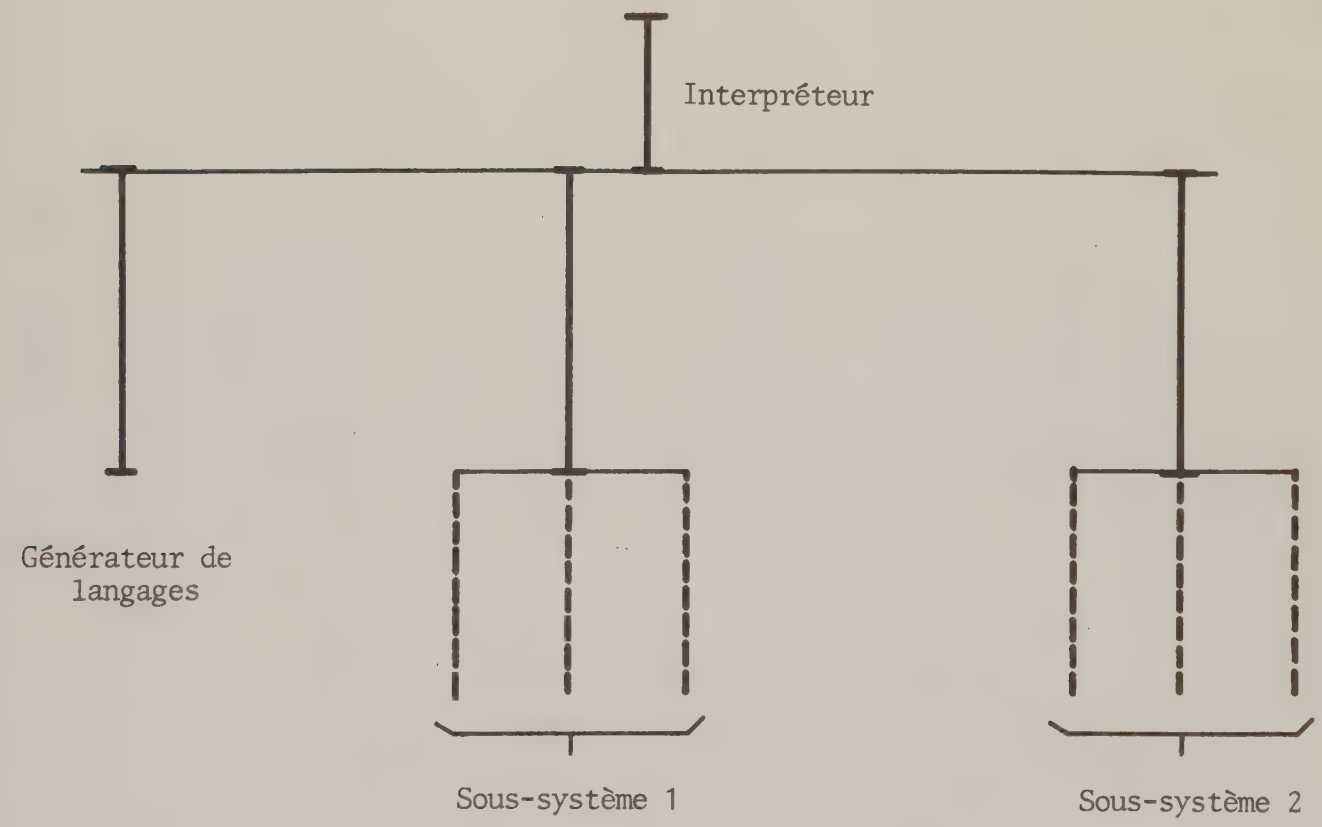


FIGURE 10 - Structure générale des programmes du système ESPACE

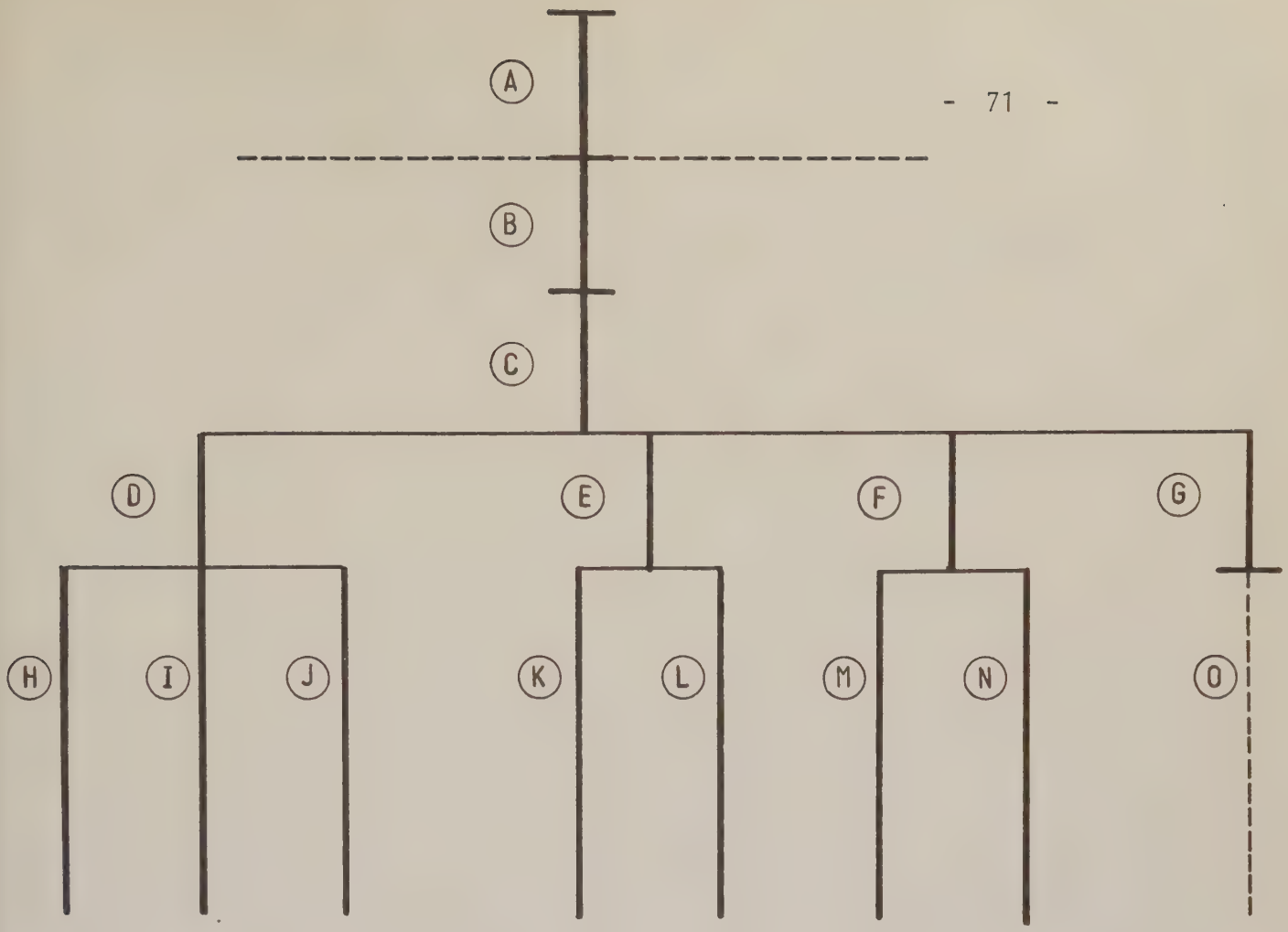


FIGURE 11 - Structure des programmes relatifs à un sous-système.

A - Interpréteur.
B - Programmes généraux du sous-système.
C - Programme exécutif.
G - Programmes d'interface avec la programmation élève.
H - Programmes de création des réalisations.
I - Programmes de création des liaisons.
J - Programmes de mise à jour des caractéristiques.
K - Programmes de contrôle des calculs.
L - Programmes de calcul.
M - Programmes de sorties alphanumériques.
N - Programmes de sorties graphiques.
O - Programme élève.

A est la racine de l'arbre ; elle reste toujours en mémoire centrale. B , C , D , E , F , G , H , I , J , K , L et M sont les segments de l'arbre.

A un instant donné, il n'y a en mémoire centrale qu'un seul chemin de l'arbre d'overlay, soit l'un des chemins suivants : ABCG, ABCH, ABCI, ABDJ, ABDK, ABEL, ABEM ou ABF.

De plus, l'emplacement des programmes en mémoire est déterminé par leur fonction relative dans l'arbre d'overlay. Par exemple, supposons que le chemin ABCH soit en mémoire centrale et que l'on désire réaliser un branchement sur un programme du segment J. Alors le chemin ABDJ doit être chargé. AB s'y trouvant déjà, DJ remplace CH. Ainsi, D est chargé à partir de la même adresse que l'était D. Ce mode de branchement est ainsi plus rapide qu'un branchement dynamique car, si le programme est déjà en mémoire centrale, son emplacement est alors déterminé par sa position dans l'arbre d'overlay et, dans le cas contraire, il n'y a pas à rechercher un emplacement de chargement. Cet emplacement est aussi déterminé par l'arbre d'overlay.

Cependant, le branchement entre segment reste plus lent que le branchement direct. A l'intérieur d'un segment, les branchements sont directs.

Notons que la structure d'overlay précédente peut être améliorée pour une application donnée par une décomposition de chacun des segments G, H, I, J, K, L et M en plusieurs segments.

D'une manière générale, comme la taille minimale de mémoire centrale est déterminée par le chemin le plus long de l'arbre, il est préférable d'avoir des chemins de longueurs semblables.

Enfin, l'overlay n'empêche pas d'utiliser les branchements dynamiques si cela est nécessaire.

Nous espérons que ces différents modes de branchement permettront d'implanter le système ESPACE sur un ordinateur de taille réduite, tout en conservant l'intégration de tous les programmes dans le système et sans que les temps de réponses ne deviennent prohibitifs. La satisfaction de ces deux dernières conditions est, en effet, pédagogiquement essentielle.

TROISIEME PARTIE : EXEMPLE DE REALISATION, LE TRANSFORMATEUR

- La version actuelle du système ESPACE, avec le TRANSFORMATEUR comme sous-système particulier, est écrite en PL/1. Elle est opérationnelle sous le système conversationnel CMS, dans une machine virtuelle générée par le système de temps partagé CP d'exploitation de l'I. B. M. 360/67.

- L'utilisation du sous-système TRANSFORMATEUR est complètement décrite dans un manuel d'emploi fourni aux élèves. Tout en indiquant les possibilités du système quant à la construction du transformateur et en précisant les algorithmes, avec leurs conditions de validité, choisis pour réaliser le calcul des caractéristiques, ce manuel résume les principes de construction et de calcul des transformateurs enseignés dans le cours correspondant de l'enseignement actuel. Il constitue, ainsi, la liaison entre ce cours et l'utilisation du système, et permet l'intégration de ce dernier dans l'enseignement.

CHAPITRE 1 - LE MODELE POTENTIEL ((4), (10), (32), (42), (51))

I - DOMAINE DE DEFINITION DU MODELE POTENTIEL

Nous avons défini un modèle potentiel de transformateur triphasé permettant la conception de la plupart des projets de ce type de machine compte tenu des restrictions suivantes :

1°) Le refroidissement du transformateur doit se faire naturellement dans l'air ou dans un fluide renfermé dans une cuve plane ou à ondulations.

2°) La puissance du transformateur doit être comprise entre une dizaine de KVA et environ 2 000 KVA ; en dessous de 10 KVA, la construction du transformateur est très particulière ; au-delà de 2 000 KVA, le mode de refroidissement précédent n'est en général plus suffisant. Cependant, l'utilisateur du système peut, en y ajoutant certains programmes, travailler en dehors des limites précédentes.

3°) Le circuit magnétique doit être du type à trois colonnes à plat. C'est le type le plus fréquemment utilisé dans la gamme de puissances précédente.

4°) Les montages zigzag ne sont possibles ni au primaire, ni au secondaire. Mais ils ne représentent pas les montages les plus courants.

5°) Il ne peut y avoir de bobine tertiaire.

6°) Aucune prise de réglage n'est possible sur les bobinages.

Cependant, ces restrictions ne nuisent pas à l'efficacité pédagogique du système, car le domaine de travail, qu'elles délimitent, contient la plupart des projets proposés aux élèves ingénieurs. De plus, d'une manière générale, il est toujours possible à l'utilisateur du système d'éliminer une partie de ces restrictions, en y ajoutant les programmes nécessaires.

II - STRUCTURATION DES INFORMATIONS

II - 1 - Les entités et les liaisons

Nous avons défini la structuration des informations dans le modèle potentiel par le schéma de la figure 12 (1)

Remarque sur cette structuration

1°) Les relations hiérarchiques y sont indiquées en trait plein, les relations associatives en pointillé. Chacune d'elles est représentée dans les deux sens sur la structure des réalisations.

2°) Les composants dont nous permettons la reproduction identique par le système sont : le noyau, la culasse, l'enroulement, l'empilage, la galette, la couche, la spirale et l'intervalle.

3°) L'intervalle est un composant qui n'est relié à aucun autre composant par une relation hiérarchique. Nous avons préféré, en effet, alléger la programmation et l'utilisation du système, en utilisant le fait que l'appartenance d'un intervalle à un composant était entièrement déterminée par sa position dans le trans-

(1)-Par empilage, nous signifions la superposition de galette(s) comprise entre deux culasses du circuit magnétique.

-L'intervalle est un espace isolant pouvant prendre la forme de disque, cylindre ou écran suivant sa position par rapport aux composants du circuit électrique.

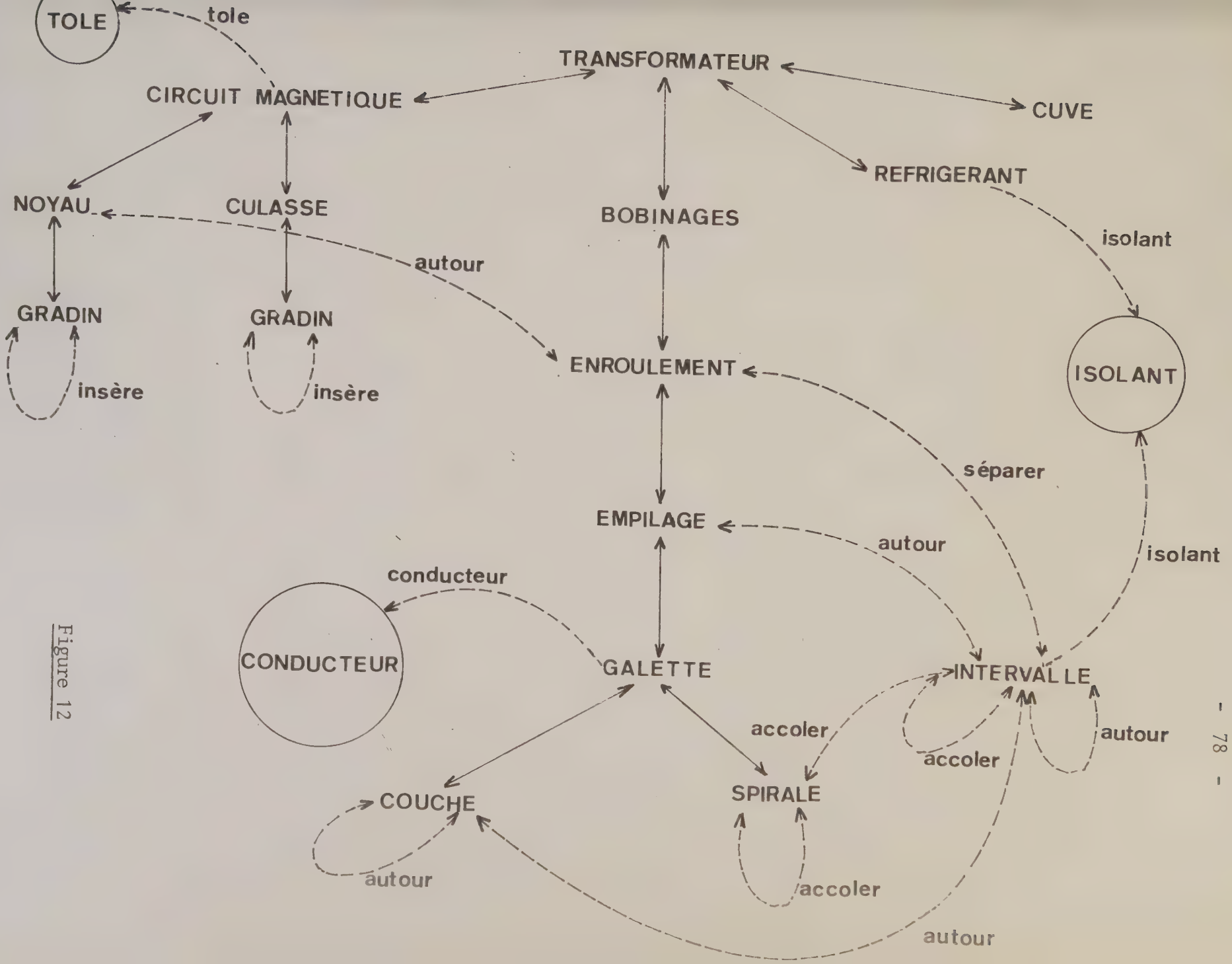

TOLE
tole
TRANSFORMATEUR
CIRCUIT MAGNETIQUE
CUVE
REFRIGERANT
NOYAU
CULASSE
BOBINAGES
isolant
autour
GRADIN
GRADIN
ENROULEMENT
ISOLANT
insère
insère
séparer
EMPILAGE
autour
isolant
conducteur
CONDUCTEUR
GALETTE
INTERVALLE
accoler
autour
accoler
SPIRALE
COUCHE
autour
accoler
autour

Figure 12

formateur. Ainsi, une relation hiérarchique prévue sur le composant intervalle aurait été redondante.

4°) En plus des composants, le modèle potentiel comporte des matériaux tôle, conducteur et isolant qui peuvent être affectés respectivement aux composants circuit magnétique, galette et intervalle ou réfrigérant. Les relations correspondantes ne sont représentées sur la structure des réalisations que dans un seul sens, à savoir du composant vers le matériau. Le matériau est ainsi considéré par le système comme un ensemble de propriétés spécifiques partageables par plusieurs composants.

II - 2 - Caractéristiques des composants et matériaux

Nous nous sommes actuellement limités aux caractéristiques qui sont indispensables pour l'établissement d'un projet de transformateur. Nous allons les énumérer pour chacun des composants ou matériaux, en soulignant en trait plein celles qui sont considérées par les algorithmes comme des caractéristiques hypothèses. D'autre part, nous avons prévu dans le système la possibilité de prédéterminer un circuit magnétique et ses composants. Dans ce cas, les caractéristiques soulignés en pointillé, pour le noyau et la culasse, deviennent des hypothèses et ne sont plus calculées par les algorithmes du système.

Toutes les caractéristiques sont exprimées dans le système MKSA.

TRANSFORMATEUR

TENSION PRIMAIRE GLOBALE
INTENSITE SECONDAIRE GLOBALE
COSINUS SECONDAIRE (>o si le débit est inductif)
(<o si le débit est capacitif)
FREQUENCE
PUISSANCE PRIMAIRE
PUISSANCE SECONDAIRE
PUISSANCE APPARENTE SECONDAIRE
PERTES TOTALES
PERTES SUPPLEMENTAIRES
RENDEMENT
TENSION SECONDAIRE A VIDE GLOBALE
TENSION SECONDAIRE EN CHARGE GLOBALE
RAPPORT DE TRANSFORMATION GLOBAL
CHUTE INDUCTIVE RAMENEE AU SECONDAIRE
CHUTE RESISTIVE RAMENEE AU SECONDAIRE
INTENSITE PRIMAIRE A VIDE GLOBALE
COSINUS DE COURT CIRCUIT
TENSION PRIMAIRE DE COURT CIRCUIT GLOBALE

CIRCUIT MAGNETIQUE

JOINTS (ne peut prendre que les valeurs 45 ou 90)
PERTES FER
PUISSANCE MAGNETISANTE
POIDS

NOYAU

PERTES FER
PUISSANCE MAGNETISANTE
POIDS
INDUCTION
SECTION FER
HAUTEUR MOYENNE
DIAMETRE EXTERIEUR
COEFFICIENT D'UTILISATION
FLUX
TENSION PAR SPIRE
NOMBRE DE TOLES

CULASSE	PERTES FER
	PUISSANCE MAGNETISANTE
	POIDS
	INDUCTION
	SECTION FER
	LONGUEUR MOYENNE
	NOMBRE DE TOLES
GRADIN	LARGEUR
	NOMBRE DE TOLES
TOLE	EPAISSEUR FER
	EPAISSEUR TOTALE
	FOISONNEMENT
	DENSITE
	PERTES PAR KILO (INDUCTION)
	PUISSANCE MAGNETISANTE PAR KILO (INDUCTION)
BOBINAGES	MONTAGE PRIMAIRE } (ne peuvent prendre que les valeurs D, Y ou YN)
	MONTAGE SECONDAIRE }
	PERTES TOTALES
	INTENSITE SECONDAIRE DE PHASE
	TENSION PRIMAIRE PAR PHASE
	CHUTE RESISTIVE PAR PHASE RAMENEE AU SECONDAIRE
	CHUTE INDUCTIVE PAR PHASE RAMENEE AU SECONDAIRE
ENROULEMENT	HAUTEUR TOTALE
	DIAMETRE D'ENROULEMENT
	EPAISSEUR
	PERTES PRIMAIRES
	PERTES SECONDAIRES
	RESISTANCE PRIMAIRE
	RESISTANCE SECONDAIRE
	REACTANCE DE FUITE RAMENEE AU SECONDAIRE
	NOMBRE DE SPIRES PRIMAIRES
	NOMBRE DE SPIRES SECONDAIRES

EMPILAGE

HAUTEUR TOTALE
DIAMETRE D'ENROULEMENT
EPAISSEUR
PERTES PRIMAIRES
PERTES SECONDAIRES
RESISTANCE PRIMAIRE
RESISTANCE SECONDAIRE
NOMBRE DE SPIRES PRIMAIRES
NOMBRE DE SPIRES SECONDAIRES

GALETTE

APPARTENANCE (ne peut prendre que les valeurs PRIMAIRE et SECONDAIRE)
HAUTEUR TOTALE
DIAMETRE D'ENROULEMENT
EPAISSEUR
PERTES JOULES
PERTES SUPPLEMENTAIRES
RESISTANCE TOTALE
NOMBRE DE SPIRES
ECHAUFFEMENT MAXIMAL

SPIRALE

NOMBRE DE SPIRES

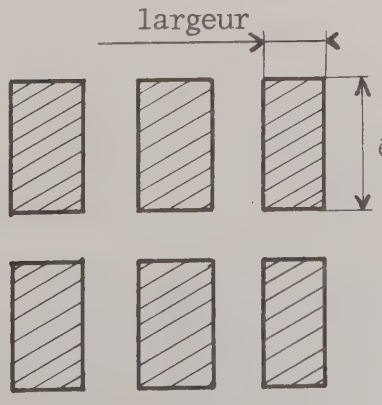
COUCHE

NOMBRE DE SPIRES

CONDUCTEUR

ISOLANT (nom d'un matériau isolant existant)
TYPE (peut prendre les valeurs MEPLAT et ROND)

Si TYPE = MEPLAT alors



LARGEUR DU BRIN NU

EPAISSEUR DU BRIN NU

NOMBRE DE BRINS PARALLELEMENT AU NOYAU (= 2 sur fig. 13)

NOMBRE DE BRINS PERPENDICULAIREMENT AU NOYAU (= 3 sur fig. 13)

FIGURE 13

Si TYPE = ROND alors

DIAMETRE DU BRIN NU

RESISTIVITE ELECTRIQUE
EPAISSEUR D'ISOLEMENT
SECTION DE CUIVRE

INTERVALLE — EPAISSEUR
TENSION MAXIMALE ISOLEE

ISOLANT — RIGIDITE DIELECTRIQUE
CONSTANTE DIELECTRIQUE
CONDUCTIBILITE THERMIQUE

REFRIGERANT — CONSTANTE D'ECHAUFFEMENT SUPERFICIEL
ECHAUFFEMENT MOYEN
ECHAUFFEMENT MAXIMAL

CUVE — PROFONDEUR D'ONDULATION
DISTANCE ENTRE ONDULATIONS
JEUX
LONGUEUR INTERNE DES TRAVERSEES
NOMBRE D'ONDULATIONS
EPAISSEUR D'ONDULATION
SURFACE TOTALE
SURFACE EFFICACE
LONGUEUR INTERNE
LARGEUR INTERNE
PROFONDEUR
EVACUATION UNITAIRE

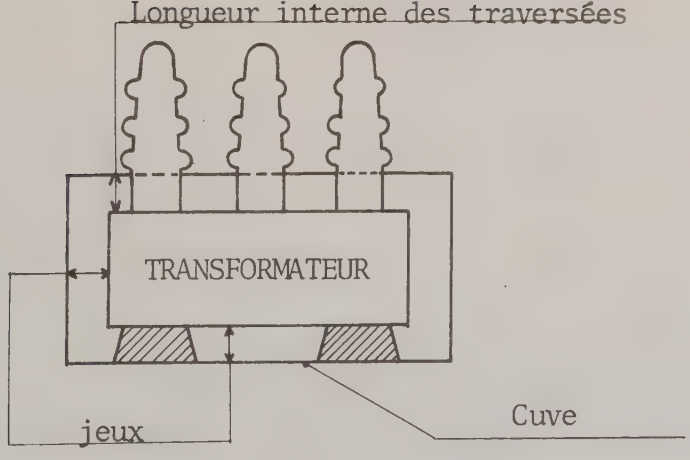


FIGURE 14

III - LES ALGORITHMES DE CALCUL

Nous n'avons pas cherché à programmer dans le système des algorithmes complexes ou nouveaux. Nous avons préféré conserver les relations théoriques ou empiriques déjà enseignées dans le cours de calculs des machines électriques, en les généralisant sous forme d'algorithmes. C'est le cas, en particulier, pour le calcul de la réactance de fuite que nous détaillons ci-dessous. Dans le cours, des expressions de cette réactance sont développées pour plusieurs cas particuliers de construction du transformateur. Nous donnons simplement une forme algorithmique générale à ces calculs.

D'autre part, les calculs nécessaires pour tester les principales conditions de validité qui ont permis d'établir ces algorithmes sont préalablement exécutés. D'une manière générale, nous prévoyons les trois possibilités suivantes :

1°) Les hypothèses de calcul sont correctement réalisées ; le calcul est alors exécuté normalement.

2°) Les hypothèses de calcul ne sont qu'approximativement réalisées ; le calcul est poursuivi, mais un avertissement est édité sur le terminal de travail de l'élève.

3°) Les hypothèses de calcul ne sont pas suffisamment bien réalisées ; le calcul est alors arrêté ; un message d'erreur est édité.

Les algorithmes programmés dans le système permettent de calculer seulement les caractéristiques conséquences décrites précédemment. Tout autre algorithme permettant le calcul d'une nouvelle caractéristique doit être spécialement rajouté au système par l'élève, après avoir été éventuellement programmé par lui.

Nous présentons ci-après l'établissement de l'algorithme du calcul de l'inductance de fuite d'un enroulement dans le cas où il est formé d'un nombre quelconque d'empilages primaires et secondaires concentriques. Un algorithme semblable peut être établi dans le cas d'un enroulement à un seul empilage formé de galettes primaires et secondaires alternées et en nombre quelconque.

Par un organigramme simplifié, nous montrons ensuite comment ces deux algorithmes sont insérés dans l'ensemble des contrôles et des calculs nécessaires à la détermination de l'inductance de fuite d'un enroulement.

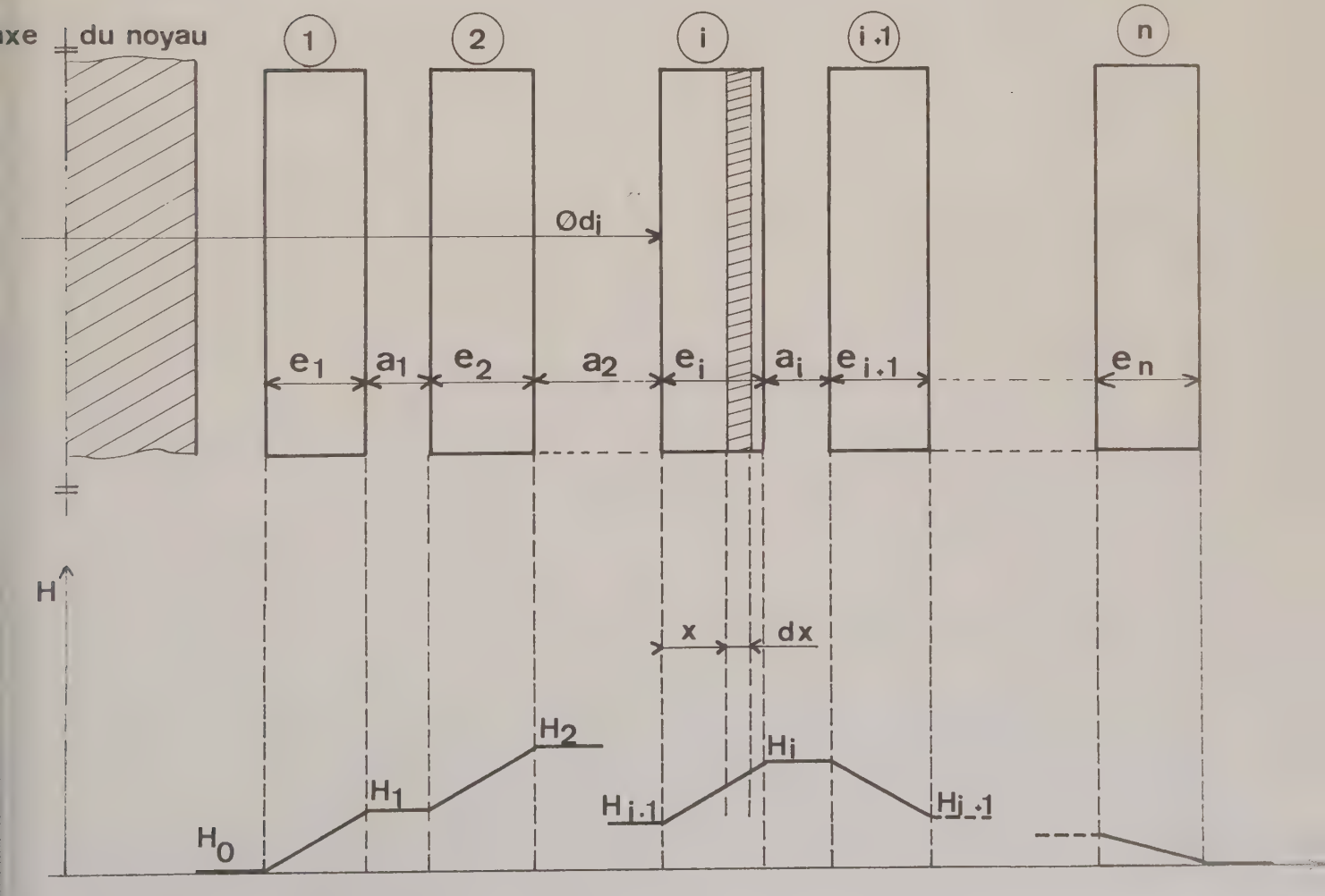


FIGURE 15 - Enroulement comportant n empilages primaires et secondaires concentriques.

La figure 15 représente un enroulement comportant n empilages primaires et secondaires concentriques. Un empilage i est caractérisé par sa hauteur hi, son épaisseur ei et son nombre de spires ni. a_i est l'épaisseur de l'intervalle isolant entre les empilages i et i + 1. Le champ magnétique dans cet intervalle est Hi.

Nous appellerons I_1 et I_2 respectivement les intensités des courants électriques primaires et secondaires dans les galettes de l'enroulement, et nous utiliserons l'expression approchée $I_1 = \frac{N2}{N1} . I2$ où N1 et N2 sont les nombres de spires primaires et secondaires de l'enroulement.

Considérons l'empilage i ; le champ magnétique en fonction de l'abscisse x définie sur la figure 15 peut y être exprimé par :

$$H(x) = H_i - 1 + \frac{ni\ Ii}{ei} \sqrt{2}\ \frac{x}{h}$$

où : $Ii = \frac{N2\ I2}{N1}$ ou I_2 suivant que l'empilage i est formé de galettes primaires ou secondaires.

L'énergie électromagnétique stockée dans l'empilage i s'écrit :

$$W^1_i = \int_o^{ei} \frac{\mu o}{2} \left[H(x)\right]^2 h_i\ \Pi\ (di + 2x)\ dx$$

$$= \int_o^{ei} \frac{\mu o}{2} \left[Hi - 1 + \frac{niIi}{ei}\sqrt{2}\ \frac{x}{h}\right]^2 hi\ \Pi(di + 2x)dx$$

soit :

$$W^1_i = \frac{\mu o \Pi ei}{2}\left[hi\ H^2_{i-1}(ei+di)+niIi\sqrt{2}\ Hi-1(\tfrac{4}{3}\ ei+di)+ \frac{ni^2Ii^2}{hi}\ (ei+\tfrac{2}{3}\ di)\right]$$

L'énergie électromagnétique stockée dans l'intervalle isolant d'épaisseur a_i est :

$$W_i^2 = \frac{\mu o}{2} Hi^2 \, hi \, \Pi \, (di + ai) \, ai$$

L'énergie totale stockée dans l'enroulement est alors :

$$W = \sum_i (W_i^1 + W_i^2)$$

Nous en déduisons l'inductance de fuite ramenée au secondaire de l'enroulement :

$$l_2 = \frac{W}{I_2^2}$$

Les principales conditions de validité de cet algorithme sont les suivantes :

1°) Les hauteurs des différents empilages doivent être sensiblement égales.

2°) La hauteur de l'enroulement doit être suffisamment grande devant son diamètre extérieur pour pouvoir négliger les effets de bord.

Nous développons, ci-après, l'organigramme simplifié correspondant à l'exécution d'une commande demandant le calcul de l'inductance de fuite d'un enroulement.

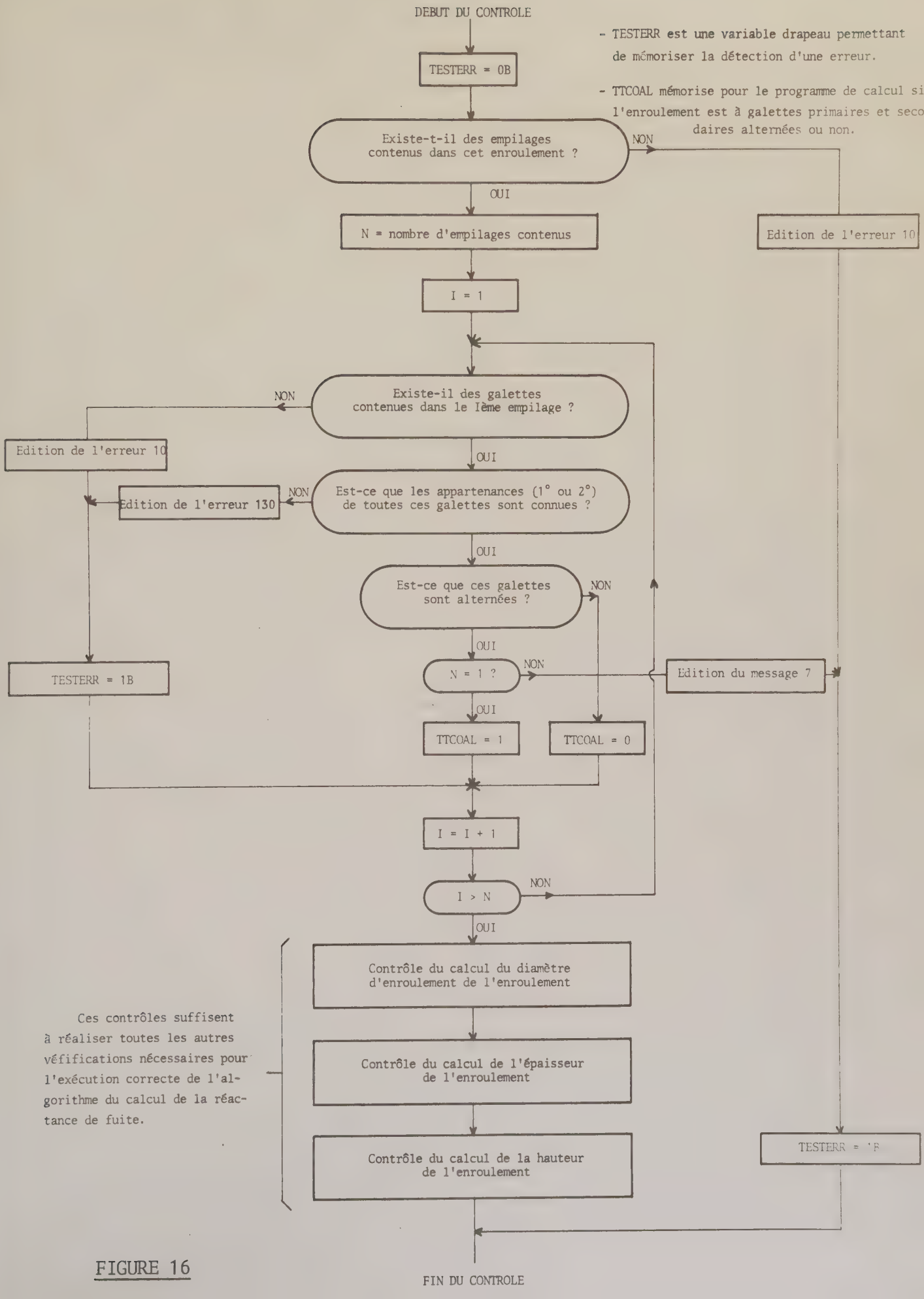

DEBUT DU CONTROLE
- TESTERR est une variable drapeau permettant de mémoriser la détection d'une erreur.
- TTCOAL mémorise pour le programme de calcul si l'enroulement est à galettes primaires et secondaires alternées ou non.
TESTERR = 0B
Existe-t-il des empilages contenus dans cet enroulement ?
NON
OUI
N = nombre d'empilages contenus
Edition de l'erreur 10
I = 1
Existe-il des galettes contenues dans le Ième empilage ?
NON
Edition de l'erreur 10
OUI
Est-ce que les appartenances (1° ou 2°) de toutes ces galettes sont connues ?
NON
Edition de l'erreur 130
OUI
Est-ce que ces galettes sont alternées ?
NON
OUI
N = 1 ?
NON
Edition du message 7
TESTERR = 1B
OUI
TTCOAL = 1
TTCOAL = 0
I = I + 1
I > N
NON
OUI
Contrôle du calcul du diamètre d'enroulement de l'enroulement
Contrôle du calcul de l'épaisseur de l'enroulement
Contrôle du calcul de la hauteur de l'enroulement
TESTERR = 1B
Ces contrôles suffisent à réaliser toutes les autres vérifications nécessaires pour l'exécution correcte de l'algorithme du calcul de la réactance de fuite.
FIN DU CONTROLE

FIGURE 16

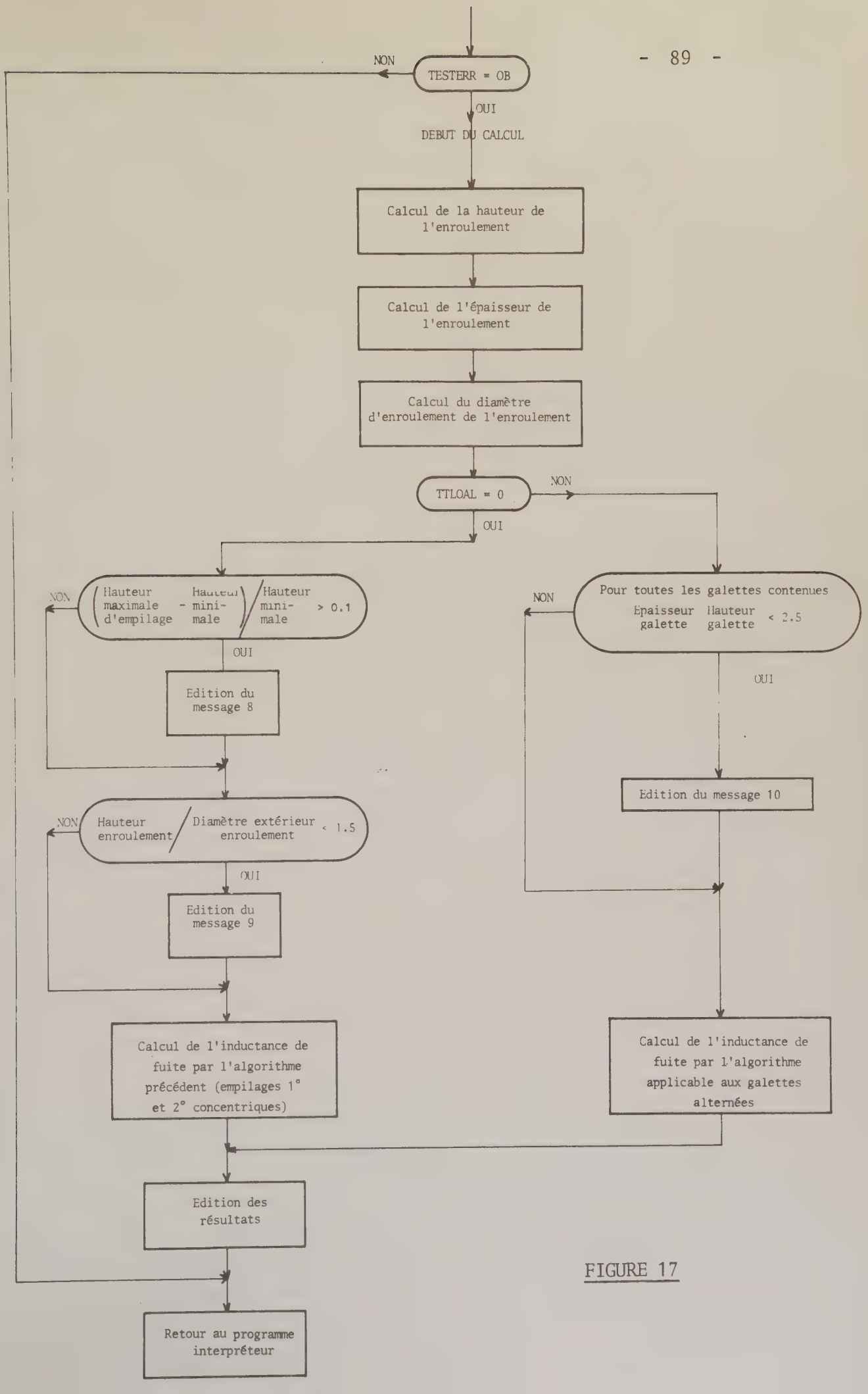

TESTERR = OB
NON
OUI
DEBUT DU CALCUL
Calcul de la hauteur de l'enroulement
Calcul de l'épaisseur de l'enroulement
Calcul du diamètre d'enroulement de l'enroulement
TTLOAL = 0
NON
OUI
Hauteur maximale d'empilage - Hauteur mini-male / Hauteur mini-male > 0.1
NON
OUI
Edition du message 8
Pour toutes les galettes contenues
Epaisseur galette Hauteur galette < 2.5
NON
OUI
Edition du message 10
Hauteur enroulement / Diamètre extérieur enroulement < 1.5
NON
OUI
Edition du message 9
Calcul de l'inductance de fuite par l'algorithme précédent (empilages 1° et 2° concentriques)
Calcul de l'inductance de fuite par l'algorithme applicable aux galettes alternées
Edition des résultats
Retour au programme interpréteur

FIGURE 17

IV - CONCLUSION

Le modèle potentiel de transformateur que nous venons de présenter, s'il est opérationnel et permet déjà un travail pédagogique effectif, ne constitue pas pour autant une solution définitive.

En effet, nous l'avons développé pendant le même temps que nous établissions les principes techniques du système, et, pour cette raison, il présente de nombreux défauts à la fois techniques et pédagogiques. Certaines modifications doivent, de ce fait, venir améliorer ses possibilités et performances.

Par ailleurs, les résultats pédagogiques obtenus lors de son utilisation par les élèves, nous conduiront certainement à prévoir d'autres modifications de ce modèle, conçu de manière suffisamment souple pour en permettre l'amélioration à travers la dynamique de nos recherches.

CHAPITRE 2 - LE LANGAGE DE COMMANDES

Le langage de commandes permet à l'utilisateur du système de réaliser, sur le modèle potentiel, les opérations de types suivants :

1°) Création des composants,

2°) Assemblage des composants créés,

3°) Spécification des matériaux,

4°) Entrée et sortie des valeurs des caractéristiques hypothèses,

5°) Calcul des caractéristiques conséquences,

6°) Fonctions diverses.

Nous allons énumérer les commandes du langage en précisant, pour chacune d'elles, son rôle du point de vue de l'utilisateur du système, ainsi que son action réelle sur la structure des réalisations développée en mémoire. Nous indiquerons aussi leur forme générale et nous terminerons la description d'une commande par des exemples d'utilisation.

Pour la représentation des paramètres, la convention suivante sera employée :

- Paramètres alphanumériques : α, $\alpha 1$, $\alpha 2$, $\alpha 3$.
- Paramètres entiers : e.
- Paramètres réels : r, r1, r2.

Par ailleurs, les trois premières lettres d'un mot clé suffisent toujours à le caractériser.

CREER

Cette commande permet de créer un composant du projet en lui affectant un nom.

Elle a pour action de réserver en mémoire la place nécessaire à (aux) la réalisation (s) de la (ou des) entité (s) correspondante (s).

Sa forme générale est la suivante :

CREER (TRANSFORMATEUR | CIRCUIT MAGNETIQUE | BOBINAGES | REFRIGERANT | CUVE | NOYAU | CULASSE | GRADIN | ENROULEMENT | EMPILAGE | GALETTE | COUCHE | SPIRALE | INTERVALLE) α ;

α est le nom donné au composant. Ce nom ne peut être donné qu'une seule fois. Il doit avoir 6 caractères au maximum.

Exemple d'utilisation :

```
CREER     NOYAU     N1  ;
CRE       GAL       G1  ;
```

IDENTIFIER

Cette commande permet de créer un composant du projet, identique à un autre déjà créé.

Elle a pour action de réserver en mémoire la place nécessaire à la réalisation de la première des deux entités symbolisant le composant et d'y enregistrer l'adresse de la réalisation de la deuxième entité. La place de cette dernière réalisation a été réservée lors de la création du composant que l'utilisateur désire reproduire.

Sa forme générale est la suivante :

IDENTIFIER α1 α2 ;

α2 est le nom du composant préalablement créé.

α1 est le nom du composant qui, par cette commande, est créé identique au précédent.

Cette commande ne peut être appliquée qu'aux composants des types suivants : NOYAU, CULASSE, ENROULEMENT, EMPILAGE, GALETTE, COUCHE, SPIRALE, INTERVALLE.

Exemples d'utilisation :

```
CREER       NOYAU     N1  ;
IDENTIFIER  N2        N1  ;
IDE         N3        N1  ;
```

ELEMENT

Cette commande sert à établir une relation hiérarchique entre deux composants.

Son action est d'enregistrer convenablement, dans chacune des deux réalisations représentant les composants, l'adresse de l'autre réalisation.

Sa forme générale est la suivante :

ELEMENT α1 α2 ;

α1 est le nom du composant contenant le composant de nom α2.

Exemples d'utilisation :

```
CREER    NOYAU   N1  ;
CREER    GRADIN  G1  ;
CREER    GRADIN  G2  ;
ELEMENT   N1     G1  ;
ELEMENT   N1     G2  ;
```

INSERER

Cette commande permet d'insérer un gradin dans un autre.

Son action est d'enregistrer convenablement, dans chacune des deux réalisations représentant les gradins, l'adresse de l'autre réalisation.

Sa forme générale est la suivante :

INSERER α1 α2 ;

α1 est le nom du gradin inséré dans le gradin de nom α2.

Exemple d'utilisation :

```
CRE    GRA   G1  ;
CRE    GRA   G2  ;
INSERER G1   G1  ;
```

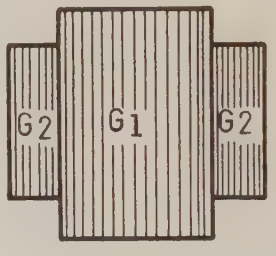


FIGURE 18

AUTOUR

Cette commande permet de situer, l'un par rapport à l'autre, deux composants de formes cylindriques.

Son action est d'enregistrer convenablement, dans chacune des deux réalisations représentant les composants, l'adresse de l'autre réalisation.

Sa forme générale est la suivante :

AUTOUR α1 α2 ;

α2 est le nom du composant placé autour du composant de nom α 1.

Le composant de nom α1 peut avoir l'un des types suivants :	Le composant de nom α2 doit alors avoir l'un des types suivants :
COUCHE	COUCHE, INTERVALLE
EMPILAGE	INTERVALLE
INTERVALLE	COUCHE, EMPILAGE, INTERVALLE
NOYAU	ENROULEMENT

Exemple d'utilisation :

```
CREER  INTERVALLE  INT  ;
CREER  EMPILAGE    EMP  ;
AUTOUR  INT  EMP  ;
```

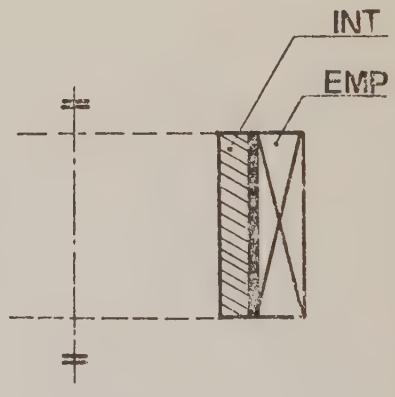


FIGURE 19

ACCOLER

Cette commande permet de situer l'un par rapport à l'autre deux composants de types SPIRALE, GALETTE ou INTERVALLE.

Son action est d'enregistrer convenablement, dans chacune des deux réalisations représentant les composants, l'adresse de l'autre réalisation.

Sa forme générale est la suivante :

ACCOLER α1 α2 ;

α1 et α2 sont les noms des composants que l'on désire accoler.

Le composant de nom α1 peut avoir l'un des types suivants :	Le composant de nom α2 doit alors avoir l'un des types suivants :
SPIRALE	SPIRALE, INTERVALLE
GALETTE	INTERVALLE
INTERVALLE	SPIRALE, GALETTE, INTERVALLE

Exemple d'utilisation :

```
CREER      GALETTE    GAL1  ;
IDENTIFIER GAL2       GAL1  ;
CREER      INTERVALLE INT   ;
ACCOLER    GAL1       INT   ;
ACCOLER    INT        GAL2  ;
```

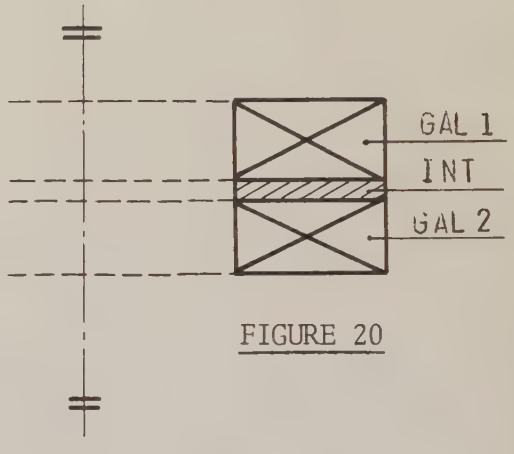


FIGURE 20

SEPARER

Cette commande permet d'indiquer les positions relatives de deux enroulements en les séparant par un intervalle.

Son action est d'enregistrer convenablement, dans chacune des deux réalisations représentant les enroulements, l'adresse de la réalisation représentant l'intervalle et, inversement, dans cette dernière, les adresses des deux premières réalisations.

Sa forme générale est la suivante :

SEPARER α1 α2 α3 ;

α3 est le nom de l'intervalle séparant les deux enroulements de noms α1 et α2.

Exemple d'utilisation :

```
CREER ENROULEMENT ENR1 ;
IDENTIFIER ENR2 ENR1 ;
IDENTIFIER ENR3 ENR1 ;
CREER INTERVALLE ECR1 ;
IDENTIFIER ECR2 ECR1 ;
SEPARER ENR1 ENR2 ECR1 ;
SEPARER ENR3 ENR1 ECR2 ;
```

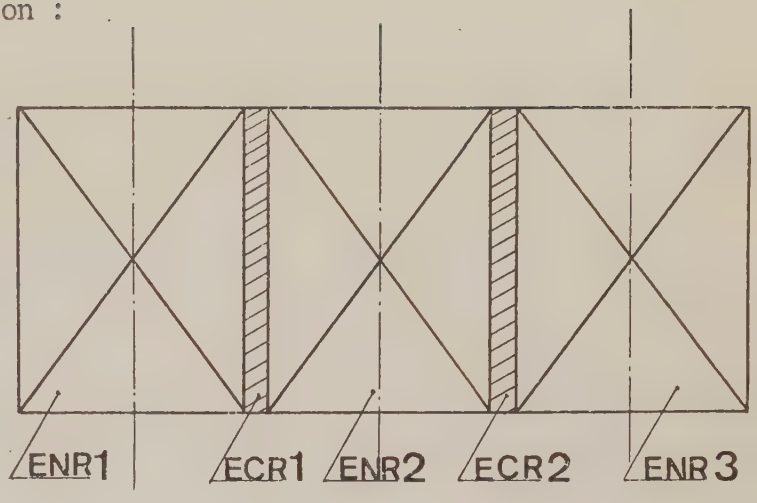


FIGURE 21

MATERIAU

Cette commande permet de définir un matériau utilisable pour la construction du transformateur.

Elle a pour action de réserver en mémoire la place nécessaire à la réalisation de l'entité symbolisant le matériau.

Sa forme générale est la suivante :

MATERIAU { TOLE / CONDUCTEUR / ISOLANT } α ;

α est le nom donné au matériau. Il ne peut être donné qu'une seule fois et doit avoir 6 caractères au maximum.

Exemple d'utilisation :

```
MATERIAU   TOLE   T
MAT    CON    C   ;
MAT    ISO    I   ;
```

TOLE, CONDUCTEUR, ISOLANT

Ces commandes permettent d'affecter un matériau à un composant.

Leur action est d'enregistrer dans la réalisation représentant le composant l'adresse de la réalisation représentant le matériau.

Leur forme générale est la suivante :

(TOLE / CONDUCTEUR / ISOLANT) α1 α2 ;

α1 est le nom du matériau affecté au composant de nom α2.

Exemple d'utilisation :

```
CREER   CIRCUIT MAGNETIQUE   CM  ;
CREER     GALETTE     G1  ;
CRE     INTERVALLE     INT  ;
MATERIAU    TOLE    T  ;
MAT    CON    C  ;
MAT    ISO    I  ;
TOLE    T    CM  ;
CONDUCTEUR    C    G1  ;
ISOLANT    I    INT  ;
```

COUPER LIAISONS

Cette commande permet de couper toutes les liaisons relatives à un composant qui ont été établies à l'aide des commandes précédentes.

Son action est d'effacer, dans la réalisation représentant le composant, les adresses de toutes les réalisations auxquelles elle est reliée, après avoir effacé, dans ces réalisations l'adresse de la première réalisation.

Sa forme générale est la suivante :

COUPER LIAISONS α ;

α est le nom du composant que l'on veut isoler. Ce composant doit avoir l'un des types suivants : NOYAU, CULASSE, GRADIN, ENROULEMENT, EMPILAGE, GALETTE, SPIRALE, COUCHE, INTERVALLE, REFRIGERANT, CUVE.

ENTRER

Cette commande permet de donner une valeur à une caractéristique hypothèse d'un composant ou matériau.

Son action est d'enregistrer la valeur donnée à cette caractéristique à la place qui lui est réservée dans la réalisation représentant le composant ou le matériau.

Sa forme générale est la suivante :

ENTRER {HYPOTHESE} α1 $\begin{pmatrix} r \\ e \\ \alpha 2 \end{pmatrix}$

{HYPOTHESE} représente l'ensemble des caractéristiques définies dans le chapitre précédent.

α1 est le nom du composant ou matériau pour lequel on donne la valeur r, e ou α2 d'une caractéristique hypothèse.

Exemple d'utilisation :

```
CREER   CIRCUIT   MAGNETIQUE   CM  ;
ENTRER    JOINTS     CM     45  ;
MATERIAU    TOLE     T  ;
ENTRER   EPAISSEUR   FER   T   0.35 E-3  ;
```

FONCTION

Cette commande permet de définir, pour un matériau TOLE, un point de l'une des deux fonctions PERTES PAR KILO (INDUCTION) ou PUISSANCE MAGNETISANTE PAR KILO (INDUCTION).

Son action est de créer une réalisation de l'entité de type point et de la chaîner à la réalisation représentant le matériau TOLE. La valeur de la fonction et celle de l'induction sont enregistrées dans la réalisation créée.

Sa forme générale est la suivante :

FONCTION { PERTES (PAR) KILO / PUISSANCE MAGNETISANTE (PAR) KILO } α r1 (INDUCTION) r2 ;

r1 est la valeur affectée à la fonction pour la valeur r2 de l'induction, dans le matériau TOLE de nom α.

Exemple d'utilisation :

```
MATERIAU   TOLE   T  ;
FONCTION  PERTES  KILO  T  0.55  INDUCTION 1  ;
```

SORTIR

Cette commande permet d'interroger l'état d'un projet en cours. Elle donne la possibilité de connaître toutes les liaisons relatives à un composant ainsi que les valeurs des caractéristiques hypothèses.

Cette commande n'a aucune action sur la structure des réalisations. Elle va simplement y rechercher les renseignements nécessaires.

Sa forme générale est la suivante :

SORTIR ⟨ LIAISONS | PERTES (PAR) KILO | PUISSANCE MAGNETISANTE (PAR) KILO | {HYPOTHESE} ⟩ α ;

{HYPOTHESE} a été défini à la commande ENTRER ;

α est le nom du composant ou matériau sur lequel on demande des renseignements.

Exemple d'utilisation :

```
CREER   GALETTE   GAL  ;
ENTRER  APPARTENANCE  GAL  PRIMAIRE  ;
SORTIR  APPARTENANCE  GAL  ;
```

Appartenance gal primaire.

PREDETERMINATION

Cette commande permet de débuter ou de finir la prédétermination d'un circuit magnétique.

Son action est de mettre à jour une caractéristique réservée à cet effet dans la réalisation représentant le circuit magnétique.

Sa forme générale est la suivante :

PREDETERMINATION CIRCUIT MAGNETIQUE α $\left\{\begin{matrix}\text{DEBUT}\\ \text{FIN}\end{matrix}\right\}$;

α est le nom du circuit magnétique.

CALCULER

Cette commande permet de calculer la valeur d'une caractéristique conséquence d'un composant ou matériau.

Son action est d'abord de contrôler si le calcul est possible et dans ce cas, d'effectuer le calcul. Les valeurs des caractéristiques conséquences calculées sont enregistrées dans les réalisations correspondantes.

Sa forme générale est la suivante :

CALCULER {CONSEQUENCE} α ;

{CONSEQUENCE} représente l'ensemble des caractéristiques conséquences définies dans le chapitre précédent.

α est le nom du composant ou du matériau auquel se rapporte la caractéristique conséquence.

Exemple d'utilisation :

```
CREER   ENROULEMENT   ENR ;
CALCULER REACTANCE FUITE RAMENEE SECONDAIRE ENR ;
```

VARIATION

Cette commande permet de faire calculer au système la variation d'une caractéristique conséquence en fonction de celle d'une caractéristique hypothèse.

Elle a pour action de contrôler d'abord si le calcul est possible et dans ce cas, d'effectuer le calcul de façon répétitive (6 fois). Le système demande avant le calcul les bornes de variation de la caractéristique hypothèse.

Sa forme générale est la suivante :

VARIATION {CONSEQUENCE} α1 {HYPOTHESE} α2 ⟨ IMPRIMEE / GRAPHIQUE ⟩ ;

{CONSEQUENCE} a été défini pour la commande CALCULER.

{HYPOTHESE} a été défini pour la commande ENTRER.

α2 est le nom du composant ou matériau auquel s'applique la caractéristique hypothèse.

Si l'option IMPRIMEE est choisie, les résultats sont présentés sous forme de tableau ; si l'option GRAPHIQUE est choisie, les résultats sont présentés sous forme de courbe. Cette dernière commande n'est utilisable que sur le terminal à écran de visualisation graphique.

Exemple d'utilisation :

```
CREER   NOYAU   N1  ;
CREER   GRADIN   G  ;
VARIATION  COEFFICIENT  UTILISATION  N1 LARGEUR  G  IMP  ;
```

TRACE

Cette commande permet de demander au système de sortir ou non la trace des calculs.

Son action est de mettre à jour une variable dont la valeur est testée lorsque les calculs sont effectués.

Sa forme générale est la suivante :

TRACE $\left(\begin{matrix}\underline{\text{OUI}} \\ \underline{\text{NON}}\end{matrix}\right)$;

INITIALISER

Cette commande est la première qui doit être envoyée au système. Elle permet l'initiation d'un nouveau projet ou la récupération des résultats d'un projet déjà entamé.

Son action est l'initiation de certaines variables et, éventuellement, la récupération sur disque des résultats précédemment acquis et leur chargement en mémoire centrale.

Sa forme générale est la suivante :

INITIALISER α ;

α est le nom donné au projet. Il a 6 caractères au maximum.

SAUVER

Cette commande permet de sauvegarder les résultats d'un projet entre deux utilisations du système.

Elle a pour action de recopier sur disque la structure des réalisations développée en mémoire centrale.

Sa forme générale est la suivante :

SAUVER ;

ARRETER

Cette commande est la dernière qui doit être envoyée au système. Elle permet de quitter le système ESPACE.

Sa forme générale est la suivante :

ARRETER ;

CHAPITRE 3 - EXEMPLE DE CONCEPTION D'UN PROJET DE TRANSFORMATEUR AVEC LE SYSTEME ESPACE

Nous donnons ci-après un exemple de conception d'un projet de transformateur avec le système ESPACE. Nous avons préféré réduire la taille de cet exemple en reprenant le compte rendu d'un projet déjà réalisé ; ainsi, nous n'avons pas eu à faire d'itération pour obtenir une solution. Néanmoins, l'exemple doit permettre de mieux discerner les possibilités offertes par le système ESPACE.

Les caractéristiques générales du transformateur construit sont les suivantes :

PUISSANCE	200 KVA
FREQUENCE	60 Hz
TENSION PRIMAIRE	10 KV
TENSION SECONDAIRE	0,23 KV
COUPLAGE	Dy
TENSION DE COURT CIRCUIT	5,12 %
INTENSITE A VIDE	0,3 A
PERTES DE COURT CIRCUIT	3 X 905 W
PERTES A VIDE	593 W

Les figures 22, 23 et 24, schématisant certaines parties du transformateur, sont destinées à faciliter la lecture de l'exemple donné.

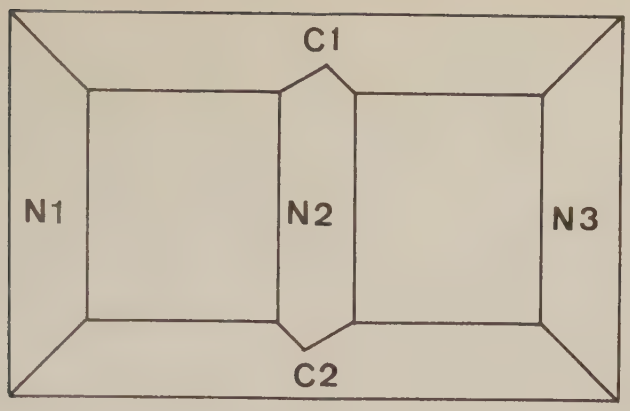


FIGURE 22 - Circuit magnétique CM du transformateur.

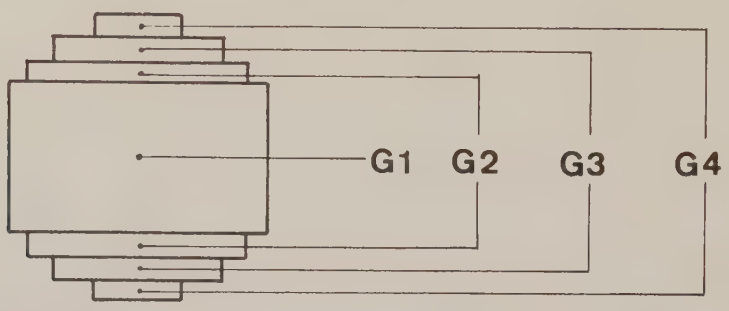


FIGURE 23 - Section des noyaux N1, N2 et N3.

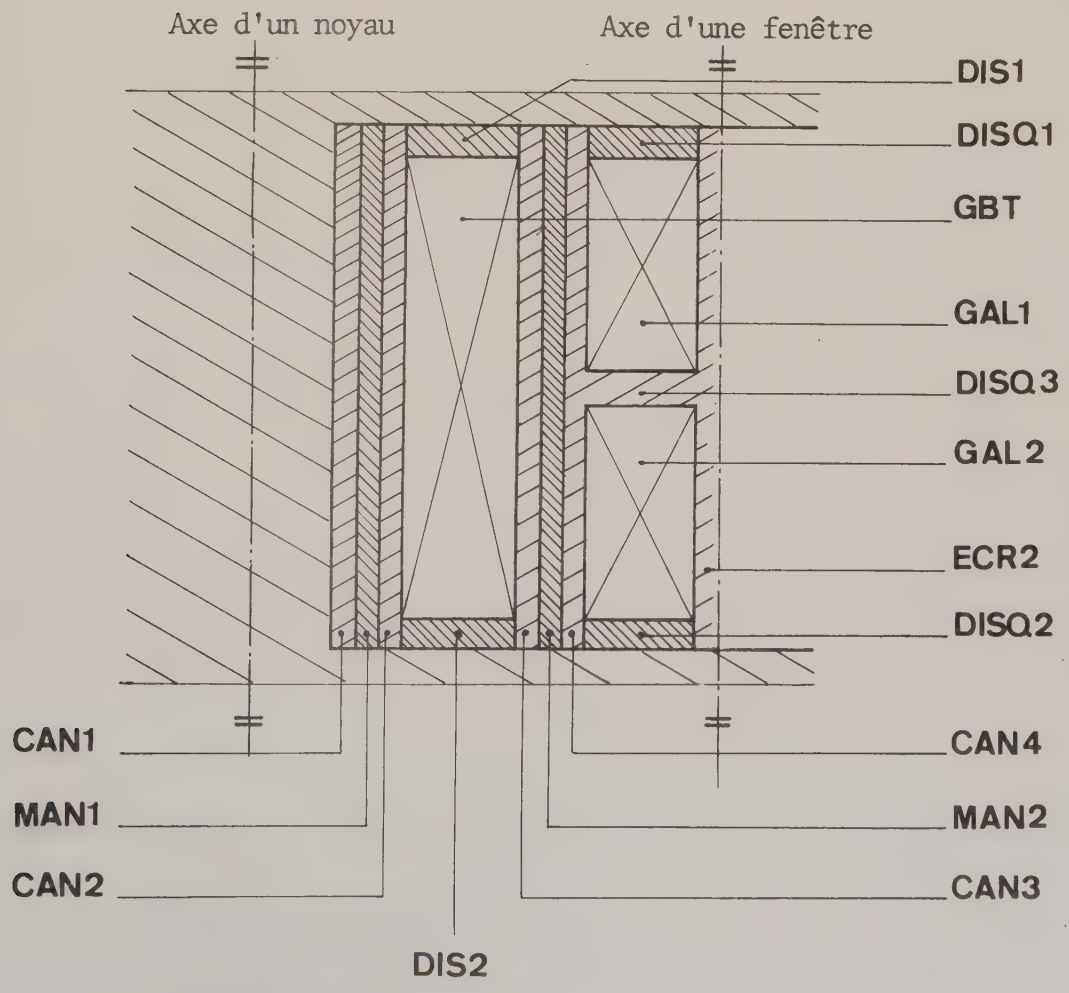


FIGURE 24 - Représentation générale de l'enroulement ENR2.

```
DEBUT DU CHARGEMENT:
NOM DU FICHIER LANGAGE ?
←TRANSFO
/NOM DE L'APPLICATION ?
←TRANSFO
DEBUT DE L'APPLICATION:'TRANSFO '

←INITIALISER TRANSF ;
PROJET INEXISTANT
PROJET CREE
CREATION TERMINEE . OK

←/*** CONSTRUCTION ET PREDETERMINATION DU CIRCUIT MAGNETIQUE ***/

←

←/   CONSTRUCTION DU CIRCUIT MAGNETIQUE   /

←CREER CIRCUIT MAGNETIQUE CM ;
OK

←CREER NOYAU N1 ;
OK

←IDENTIFIER N2 N1 ; IDE N3 N1 ;
OK
OK

←CREER CULASSE C1 ; IDENTIFIER C2 C1 ;
OK
OK

←ELEMENT CM N1 ; ELE CM N2 ; ELE CM N3 ; ELE CM C1 ; ELE CM C2 ;
OK
OK
OK
OK
OK

←CREER GRADIN G1 ; CRE GRA G2 ; CRE GRA G3 ; CRE GRA G4 ; CRE GRA G5 ;
OK
OK
OK
OK
OK

←INSERER G1 /DANS/ G2 ;
OK

←INS G2 G3 ; INS G3 G4 ;
OK
OK
```

```
-ELEMENT N1 G1 ;
OK
N1              G2              MESS1
N1              G3              MESS1
N1              G4              MESS1

-ELEMENT C1 G5 ;
OK

-MATERIAU TOLE T ;
OK

-TOLE T CM ;
OK

-SAUVER ;
*
/*
FAITES RETOUR CHARIOT

-
/PROJET CONSERVE

-/   ENTREE DES HYPOTHESES   /

-PREDETERMINATION CIRCUIT MAGNETIQUE CM DEBUT ;
/OK

-ENTRER EPAISSEUR FER T 0.35E-3 ;
OK

-ENTRER EPAISSEUR TOTALE T 0.35E-3 ;
OK

-ENTRER FOISONNEMENT T 1.05 ;
OK

-FONCTION PERTES PAR KILO T 1.37 INDUCTION 1.65 ;
OK

-FONCTION PERTES KILO T 1.15 1.36 ;
OK

-FON PUISSANCE MAGNETISANTE PAR KILO T 3.80 INDUCTION 1.65 ;
OK

-FON PUI MAG KIL T 0.87 1.36 ;
OK

-ENTRER LARGEUR G1 0.142 ;
OK

-ENT LARGEUR G2 0.124 ;
OK

-ENT LAR G3 0.094 ; ENT LAR G4 0.062 ; ENT LAR G5 0.142 ;
OK
OK
OK
```

```
-ENT NOMBRE TOLES G1 165 ;
OK

-ENT NOM TOL G2 100 ;
OK

-ENT NOM TOL G3 80 ;
OK

-ENT NOM TOL G4 54 ;
OK

-ENT NOM TOL G5 400 ;
OK

-ENT INDUCTION N1 1.65 ;
OK

-ENT HAUTEUR MOYENNE N1 0.355 ;
OK

-ENT LONGUEUR MOYENNE C1 0.630 ;
OK

-ENT JOINTS CM 45 ;
OK

-SAUVER ;
*
/*
FAITES RETOUR CHARIOT

-
//PROJET CONSERVE

-

-/   QUELQUES VERIFICATIONS   /

-SORTIR LIAISONS CM ;
TOLE                          T
ELEMENTS :
N1
N2
N3
C1
C2

-SORTIR LIAISONS N1 ;
ELEMENT DE                    CM
ELEMENTS :
G1
G2
G3
G4

-SOR LIA G2 ;
ELEMENT DE                    N1
INSERE                        G1
INSERE PAR                    G3
```

```
-SOR LIA N2 ;
ELEMENT DE                    CM
ELEMENTS :
G1
G2
G3
G4

-SOR INDUCTION N2 ;
INDUCTION      N2             1.6500E+00

-SOR PERTES KILO T ;
PERTES/KILO                   INDUCTION
   1.8700E+00                    1.6500E+00
   1.1500E+00                    1.3600E+00


-/   CALCUL DES CARACTERISTIQUES DU CIRCUIT MAGNETIQUE   /

-CALCULER COEFFICIENT UTILISATION N1 ;
SECTION FER    N1             1.6344E-02
DIAMETRE EXT   N1             1.5920E-01
COEFF UTILIS   N1             8.2108E-01

-CALCULER POIDS CM ;
T              ERR                103
T              ERR                103

-ENTRER DENSITE T 7.65E3;
OK

-CALCULER POIDS CM ;
/SECTION FER    N1             1.6344E-02
POIDS           N1             4.4387E+01
SECTION FER     C1             1.9880E-02
POIDS           C1             1.0342E+02
POIDS           CM             3.3999E+02

-CAL PERTES FER CM ;
SECTION FER     N1             1.6344E-02
POIDS           N1             4.4387E+01
PERTES          N1             8.3004E+01
NB DE TOLES     N1                399
NB DE TOLES     C1                400
SECTION FER     N1             1.6344E-02
FLUX            N1             2.6968E-02
SECTION FER     C1             1.9880E-02
INDUCTION       C1             1.3565E+00
SECTION FER     C1             1.9880E-02
POIDS           C1             1.0342E+02
PERTES          C1             1.1863E+02
PERTES          CM             6.0783E+02

-TRACE NON ;
OK

-CAL PUISSANCE MAGNETISANTE CM ;
PUISS.MAGN.     CM             5.7816E+03
```

```
←TRACE OUI ;
OK

←PREDETERMINATION CIRCUIT MAGNETIQUE CM FIN ;
OK

←SAUVER ;
*
/*
FAITES RETOUR CHARIOT

←
/PROJET CONSERVE

←ERR@ARRET ;
R; T=27.60/34.69 08:50:02



DEBUT DU CHARGEMENT:
NOM DU FICHIER LANGAGE ?
←TRANSFO
/NOM DE L'APPLICATION ?
←TRANSFO
DEBUT DE L'APPLICATION:'TRAISFO '

←INITIALISER TRANSF ;
PROJET DEJA EXISTANT .
LES RESULTATS PRECEDENTS SONT RECUPERES .
/RECUPERATION TERMINEE. OK

←

←/*** CONSTRUCTION DU CIRCUIT ELECTRIQUE ***/

←CREER TRANSFORMATEUR TR ;
OK

←CRE BOBINAGES BO ;
OK

←ELEMMNT TR CM ; ELE TR BO ;
OK
OK

←CRE ENROULEMENT ENR1 ; IDENTIFIER ENR2 ENR1 ; IDE ENR3 ENR1 ;
OK
OK
OK

←CRE INTERVALLE ECR1 ; IDENTIFIER ECR2 ECR1 ;
OK
OK

←SEPAREE ENR1 ENR2 ECR1 ;
/OK

←SEPARER ENR3 ENR2 ECR2 ;
OK
```

```
←ELEMENT BO ENR1 ;
OK
BO              ENR2            MESS1
BO              ENR3            MESS1

←AUTOUR N1 ENR1 ; AUT N2 ENR2 ; AUT N3 ENR3 ;
OK
OK
OK

←

←/   CONSTRUCTION DU CIRCUIT BT   /

←CREER EMPILAGE EMP2 ;
OK

←CREER GALETTE GBT ;
OK

←ELEMENT ENR1 EMP2 ;
OK

←ELE EMP2 GBT ;
OK

←CRE CO1 CO1 ; IDENTIFIER  CO2 CO1 ; IDE CO3 CO1 ;
OK
OK
OK

←CRE COUCHE CO4 ;
OK

←CRE INTERVALLE PA1 ; IDE PA2 PA1 ; IDE PA3 PA1 ;
OK
OK
OK

←AUTOUR CO1 PA1 ; AUT PA1 CO2 ; AUT CO2 PA2 ; AUT PA2 CO3 ; AUT CO3 PA3 ;
OK
OK
OK
OK
OK

←AUT PA3 CO4 ;
OK

←ELEMENT GBT CO1 ;
OK
GBT             CO2             MESS1
GBT             CO3             MESS1
GBT             CO4             MESS1

←MATERIAU CONDUCTEUR GF ;
OK

←CONDUCTEUR GF GBT ;
OK

←MATERIAU ISOLANT PAPIER ;
OK
```

```
←ISOLANT PAPIER PA1 ;
OK

←MAT ISOLANT COTON ;
OK

←ENTRER ISOLANT GF COTON ;
OK

←CREER INTERVALLE DIS1 ; IDENTIFIER DIS2 DIS1 ;
OK
OK

←ACCOLER DIS1 GBT ; ACC GBT DIS2 ;
OK
OK

←SAUVER ;
*
//*
FAITES RETOUR CHARIOT

←
/PROJET CONSERVE

←/   ENTREE DES HYPOTHESES BT   /

←ENTRER NOMBRE SPIRES CO1 5 ;
OK

←ENT NOM SPI CO4 4 ;
OK

←ENT EPAISSEUR ISOLEMENT GF 0.1E-3 ;
OK

←ENT NOMBRE BRINS PERPENDICULAIREMENT NOYAU GF 1 ;
GF                              MESS5
OK

←ENT NOM BRI PARALLELEMENT NOYAU GF 1 ;
OK

←ENTRER EPAISSEUR BRIN NU GF 0.0510 ;
OK

←ENT LARGEUR BRIN NU GF 0.0023 ;
OK

←ENT EPAISSEUR PA1 0.06E-3 ;
OK

←ENT RIGIDITE DIELECTRIQUE PAPIER 1500E4 ;
OK

←ENT EPAISSEUR DIS1 0.5E-2 ;
OK
```

```
←SAUVER ;
*
/*
FAITES RETOUR CHARIOT

←
//PROJET CONSERVE

←

←/   QUELQUES VERIFICATIONS   /

←SOR LIA ENR2 ;
ELEMENT DE                    BO
ELEMENTS :
ENR2
AUTOUR DE                     I2
SEPARE DE    ENR1             PAR          ECR1
SEPARE DE    ENR3             PAR          ECR2

←SOR LIA CO3 ;
ELEMENT DE                    GBT
ENTOURE PAR                   PA3
AUTOUR DE                     PA2

←SOR NOMBRE SPIRES CO3 ;
NBRE SPIRES    CO3                  5

←

←/   CALCUL DES DIMENSIONS DU CIRCUIT BT   /

←CALCULER TENSION MAXIMALE ISOLEE PA3 ;
U MAX ISOLEE   PA3              9.0000E+02

←CAL NOMBRE TOTAL SPIRES GBT ;
NB TOT SP.     GBT                  19

←CAL SECTION CUIVRE GF ;
SECT CUIVRE    GF               1.4230E-04

←CALCULER EPAISSEUR GBT ;
EPAISSEUR      GBT              1.8393E-02

←CAL HAUTEUR GBT ;
HAUTEUR        GBT              3.3792E-01

←CALCULER HAUTEUR EMP2 ;
HAUTEUR        GBT              3.3792E-01
HAUTEUR        EMP2             3.4792E-01

←/   CONSTRUCTION DU CIRCUIT HT   /

←CREER EMPILAGE EMP1 ;
/OK

←ELEMENT ENR1 EMP1 ;
OK

←CREER GALETTE GAL1 ; IDENTIFIER GAL2 GAL1 ;
OK
OK
```

```
←CREER COUCHE COU1 ; IDE COU2 COU1 ; IDE COU3 COU1 ; IDE COU4 COU1 ;
OK
OK
OK
OK

←IDE COU5 COU1 ; IDE COU6 COU1 ; IDE COU7 COU1 ; IDE COU8 COU1 ;
OK
OK
OK
OK

←CREER COUCHE COU9 ;
OK

←CRE INTERVALLE PAP1 ; IDE PAP2 PAP1 ; IDE PAP3 PAP1 ; ILE PAP4 PAP1 ;
OK
OK
OK
OK

←IDE PAP5 PAP1 ; IDE PAP6 PAP1 ; IDE PAP7 PAP1 ; IDE PAP8 PAP1 ;
OK
OK
OK
OK

←AUTOUR COU1 PAP1 ; AUT PAP1 COU2 ; AUT COU2 PAP2 ; AUT PAP2 COU3 ;
OK
OK
OK
OK

←AUT COU3 PAP3 ; AUT PAP3 COU4 ; AUT COU4 PAP4 ; AUT PAP4 COU5 ; AUT COU5 PAP5;
OK
OK
OK
OK
OK

←AUT PAP5 COU6 ; AUT COU6 PAP6 ; AUT PAP6 COU7 ; AUT COU7 PAP7 ; AUT PAP7 COU8;
OK
OK
OK
OK
OK

←AUT COU8 PAP8 ; AUT PAP8 COU9 ;
OK
OK

←ELEMENT GAL1 COU1 ;
OK
GAL1            COU2            MESS1
GAL1            COU3            MESS1
GAL1            COU4            MESS1
GAL1            COU5            MESS1
GAL1            COU6            MESS1
GAL1            COU7            MESS1
GAL1            COU8            MESS1
GAL9            COU9            MESS1

←MATERIAU CONDUCTEUR FF ;
OK
```

```
←CONDUCTEUR FF GAL1 ;
OK

←MATERIAU ISOLANT VERNIS ;
OK

←ENTRER ISOLANT FF VERNIS ;
OK

←ISOLANT PAPIER PAP1 ;
OK

←CREER INTERVALLE DISQ1 ; IDENTIFIER DISQ2 DISQ1 ;
/OK
OK

←CREER INTERVALLE DISQ3 ;
OK

←ACCOLER GAL1 DISQ1 ;
OK

←ACCOLER GAL1 DISQ3 ;
OK

←ACCOLER DISQ3 GAL2 ; ACC GAL2 DISQ2 ;
OK
OK

←ELEMENT EMP1 GAL1 ;
OK
EMP1            GAL2            MESS1

←SAUVER ;
*
/*
FAITES RETOUR CHARIOT

←
//PROJET CONSERVE

←/   ENTREE DES HYPOTHESES HT   /

←ENTRER DIAMETRE NU FF 1.60E-3 ;

FF                              MESS4
OK

←ENT EPAISSEUR ISOLEMENT FF 0.05E-3 ;
OK

←ENTRER NOMBRE SPIRES COU1 80 ;
OK

←ENT NOM SPI COU9 75 ;
OK

←ENT EPAISSEUR PAP1 0.3E-3 ;
OK

←ENT EPA DISQ1 1.6E-3 ;
OK
```

```
←ENT EPA DISQ3 1.3E-2 ;
OK

←SAUVER ;
*
/*
FAITES RETOUR CHARIOT

←
//PROJET CONSERVE

←

←/   QUELQUES VERIFICATIONS   /

←SOR NOM SPI COU7 ;
NBRE SPIRES    COU7                  80

←SOR LIA COU6 ;
ELEMENT DE                      GAL1
ENTOURE PAR                     PAP6
AUTOUR DE                       PAP5

←SOR LIA DISQ3 ;
JOINT A                         GAL2
JOINT A                         GAL1

←

←/   CALCUL DES DIMENSIONS DU CIRCUIT HT   /

←CALCULER SECTION CUIVRE FF ;
SECT CUIVRE    FF               2.0106E-06

←CALCULER EPAISSEUR GAL1 ;
EPAISSEUR      GAL1             1.9470E-02

←CALCULER HAUTEUR GAL1 ;
HAUTEUR        GAL1             1.5147E-01

←CAL HAU EMP2 ;
HAUTEUR        GBT              3.3792E-01
HAUTEUR        EMP2             3.4792E-01

←CAL HAU EMP1 ;
HAUTEUR        GAL1             1.5147E-01
HAUTEUR        GAL2             1.5147E-01
HAUTEUR        EMP1             3.4794E-01

←CAL HAU ENR1 ;
HAUTEUR        GBT              3.3792E-01
HAUTEUR        EMP2             3.4792E-01
HAUTEUR        GAL1             1.5147E-01
HAUTEUR        GAL2             1.5147E-01
HAUTEUR        EMP1             3.4794E-01
HAUTEUR        ENR1             3.4794E-01

←/   MISE EN PLACE DES EMPILAGES EMP1 ET EMP2   /

←CREER INTERVALLE CAN1 ;
OK
```

```
←CRE INT MAN1 ; CRE INT CAN2 ; CRE INT CAN3 ; IDENTIFIER CAN4 CAN3 ;
OK
OK
OK
OK

←CRE INT MAN2 ;
OK

←AUTOUR CAN1 MAN1 ; AUT MAN1 CAN2 ; AUT CAN2 EMP2 ; AUT EMP2 CAN3 ;
OK
OK
OK
OK

←AUT CAN3 MAN2 ; AUT MAN2 CAN4 ; AUT CAN4 EMP1 ;
OK
OK
OK

←MATERIAU ISOLANT HUILE ;
OK

←ISOLANT HUILE DISQ3 ; ISO HUILE CAN1 ; ISO HUILE CAN2 ; ISO HUILE CAN3 ;
OK
OK
OK
OK

←ISO HUILE ECR1 ;
OK

←MATERIAU ISOLANT BAK ;
OK

←MATERIAU ISOLANT BOIS ;
OK

←ISOLANT BAK MAN1 ;
OK

←ISOLANT BAK MAN2 ;
OK

←ISOLANT BOIS DIS1 ;
OK

←ISO BOIS DISQ1 ;
OK

←SAUVER ;
*
/*
FAITES RETOUR CHARIOT

←
//PROJET CONSERVE
```

```
-/   ENTREE D'HYPOTHESES   /

-ENTRER EPAISSEUR ECR1 0.7E-2 ;
OK

-ENT EPA CAN1 0.2E-2 ;
OK

-ENT EPA MAN1 0.5E-2 ;
OK

-ENT EPA CAN2 0.7E-2 ;
OK

-ENT EPA CAN3 0.7E-2 ;
OK

-ENT EPA MAN2 0.1E-2 ;
OK

-SAUVER ;
*
//*
FAITES RETOUR CHARIOT

-
/PROJET CONSERVE


 -/   CALCUL DES DIMENSIONS DU CIRCUIT MAGNETIQUE   /

 -CALCULER LONGUEUR MOYENNE C1 ;
 DIAMETRE EXT    N2              1.5920E-01
 EPAISSEUR       GBT             1.3398E-02
 EPAISSEUR       EMP2            1.3398E-02
 EPAISSEUR       GAL1            1.9470E-02
 EPAISSEUR       GAL2            1.9470E-02
 EPAISSEUR       EMP1            1.9470E-02
 EPAISSEUR       ENR2            6.1868E-02
 DIAM ENROUL     ENR2            1.5920E-01
 LONGUEUR MOY    C1              6.9691E-01

 -CALCULER HAUTEUR MOYENNE N1 ;
 HAUTEUR         GBT             3.3792E-01
 HAUTEUR         EMP2            3.4792E-01
 HAUTEUR         GAL1            1.5147E-01
 HAUTEUR         GAL2            1.5147E-01
 HAUTEUR         EMP1            3.4794E-01
 HAUTEUR         ENR1            3.4794E-01
 HAUTEUR MOY     N1              3.4794E-01

 -

 -

 -/   ENTREE D'HYPOTHESES ELECTRIQUES   /

 -ENTRER MONTAGE PRIMAIRE BO D ;
 OK
```

```
←ENT MONTAGE SECONDAIRE BO Y ;
OK

←ENT APPARTENANCE GBT SEC ;
OK

←ENT APP GAL1 PRI ;
OK

←ENT TEN PRI GLO TR 1E4 ;
OK

←ENT INTENSITE SECONDAIRE GLOBALE TR 500 ;
OK

←ENT RESISTIVITE ELECTRIQUE FF 2.2E-8 ;
OK

←ENTRER RESISTIVITE ELE GF 2.2E-8 ;
OK

←ENT FREQUENCE TR 60 ;
OK

←SAUVER ;
*
//*
FAITES RETOUR CHARIOT

←
/PROJET CONSERVE

←

←/   CALCUL DES PERTES   /

←CALCULER PERTES JOULES GBT ;
DIAMETRE EXT    N1              1.5920E-01
DIAM ENROUL     ENR1            1.5920E-01
DIAM ENROUL     EMP2            1.7320E-01
DIAM ENROUL     GBT             1.7320E-01
SECT CUIVRE     GF              1.4230E-04
RESIS TOTALE    GBT             1.7003E-03
INT 2/PHASE     BO              5.0000E+02
PERTES JOULE    GBT             4.2508E+02

←CAL PERTES JOULES GAL1 ;
DIAMETRE EXT    N1              1.59:0E-01
EPAISSEUR       GBT             1.3398E-02
EPAISSEUR       EMP2            1.3398E-02
DIAM ENROUL     ENR1            1.5920E-01
DIAM ENROUL     EMP1            2.0160E-01
DIAM ENROUL     GAL1            2.0160E-01
SECT CUIVRE     FF              2.0106E-06
RESIS TOTALE    GAL1            5.3872E+00
NB SPIRES 1     EMP2                 0
NB TOT SP       GAL1               715
NB TOT SP       GAL2               715
NB SPIRES 1     EMP1              1430
NB SPIRES 1     ENR1              1430
NB TOT SP       GBT                 19
NB SPIRES 2     EMP2                19
NB SPIRES 2     EMP1                 0
NB SPIRES 2     ENR1                19
RAPP TRANSFO    TR              2.3013E-02
PERTES JOULE    GAL1            2.3828E+02
```

```
-CAL INDUCTION N1 ;
TENS 1/PHASE    BO              1.0000E+04
NB SPIRES 1     EMP2                 0
NB TOT SP       GAL1               715
NB TOT SP       GAL2               715
NB SPIRES 1     EMP1              1430
NB SPIRES 1     ENR1              1430
SECTION FER     N1              1.6344E-02
TENS/SPIRE      N1              6.9930E+00
FLUX            N1              2.6257E-02
INDUCTION       N1              1.6053E+00

-TRACE NON ;
OK

-CALCULER PERTES SUPPLEMENTAIRES GBT ;
PERTES SUPPL    GBT             5.3163E+00

-CAL PER SUP GAL1 ;
FF                             MESS6
PERTES SUPPL    GAL1            0.0000E+00

-CAL PERTES PRIMAIRES ENR1 ;
FF                             MESS6
FF                             MESS6
PERTES PRIM     ENR1            4.7456E+02

-CAL PERTES SECONDAIRES ENR1 ;
PERTES SEC.     ENR1            4.3040E+02

-CAL PERTES FER CM ;
PERTES          CM              5.8266E+02

-CAL PUISSANCE MAGNETISANTE CM ;
PUISS.MAGN.     CM              5.2750E+03

-CAL PERTES TOTALES TR ;
FF                             MESS6
FF                             MESS6
PERTES TOT      TR              3.4333E+03

-

-/   CALCUL D'AUTRES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES   /

-CAL TENSION SECONDAIRE VIDE GLOGALE TR ;
U SEC VIDE      TR              2.3013E+02

-CAL INTENSITE VIDE GLOBALE TR ;

'VIDE'? , CODE=1005
CAL INTENSITE VIDE GLOBALE TR ;
**********************

-CAL INTENSITE PRIMAIRE VIDE GLOBALE TR ;
INTEN A VIDE    TR              3.0641E-01

-CAL REACTANCE FUITE RAMENEE SECONDAIRE ENR1 ;
ENR1                           MESS9
IND FUITE2      ENR1            3.4631E-05

-CAL CHUTE INDUCTIVE GLOBALE RAMENEE SECONDAIRE TR ;
ENR1                           MESS9
CH IND GL 2     TR              1.1306E+01
```

```
-CAL CHUTE RESISTIVE GLOBALE RAMENEE SECONDAIRE TR ;
FF                              MESS6
FF                              MESS6
CHU RES GL 2    TR               3.2917E+00

-CAL TENSION PRIMAIRE COURT CIRCUIT GLOBALE TR ;
FF                              MESS6
FF                              MESS6
ENR1                            MESS9
TENS 1 CC %     TR               5.1170E+00

-CAL COSINUS COURT CIRCUIT TR ;
FF                              MESS6
FF                              MESS6
ENR1                            MESS9
COS C.CIRC      TR               2.7954E-01

-ENT COSINUS SECONDAIRE TR 1 ;
OK

-CALCULER TENSION SECONDAIRE CHARGE GLOBALE TR ;
FF                              MESS6
FF                              MESS6
ENR1                            MESS9
ENR1                            MESS9
U 2 CHARGE      TR               2.2656E+02

-CAL PUISSANCE SECONDAIRE TR ;
FF                              MESS6
FF                              MESS6
ENR1                            MESS9
ENR1                            MESS9
PUISSANCE 2     TR               1.9620E+05

-CAL PUI PRI TR ;
FF                              MESS6
FF                              MESS6
FF                              MESS6
FF                              MESS6
ENR1                            MESS9
ENR1                            MESS9
PUISS PRIM      TR               1.9963E+05

-CALCULER RENDEMENT TR ;
FF                              MESS6
FF                              MESS6
FF                              MESS6
FF                              MESS6
/ENR1                           MESS9
ENR1                            MESS9
RENDEMENT       TR               9.8280E-01

-/*** DETERMINATION DU REFROIDISSEMENT ***/

-/   MISE EN PLACE DE LA CUVE   /

-CREER CUVE CUVE ;
OK

-CREER REFRIGERANT REF ;
OK
```

```
-ELEMENT TR CUVE ; ELE TR REF ;
OK
OK

-ISOLANT HUILE REF ;
OK

-SAUVER ;
*
/*
FAITES RETOUR CHARIOT

-
//PROJET CONSERVE

-/   ENTREE D'HYPOTHESES   /

-ENTRER CONSTANTE ECHAUFFEMENT SUPERFICIEL REF 536E-4 ;
OK

-ENT NOMBRE ONDULATIONS CUVE 41 ;
OK

-ENTRER DISTANCE /ENTRE/ ONDULATIONS CUVE 4E-2 ;
OK

-ENTRER PROFONDEUR ONDULATION CUVE 24E-2 ;
OK

-ENT LONGUEUR INTERNE TRAVERSSEE CUVE 0.18 ;
OK

-ENT JEU CUVE 70E-; ;
OK

-SORTIR JEU CUVE ;
JEU            CUVE            7.0000E-02

-/   CALCUL DES CARACTERISTIQUES DE LA CUVE   /

-TRACE NON ;
OK

-CALCULER LONGUEUR INTERNE CUVE ;
LONGUEUR INT   CUVE            1.0008E+00

-CALCULER LARGEUR INTERNE CUVE ;
LARGEUR INT    CUVE            4.2294E-01

-CALCULER PROFONDEUR INTERNE CUVE ;
PROFOND.INT.   CUVE            8.8194E-01

-CAL EPAISSEUR ONDULATION CUVE ;
EPAISS ONDUL   CUVE            2.0596E-02

-CALCULER SURFACE UTILE CUVE ;
/SURF UTILE    CUVE            7.2281E+00

-CALCULER SURFACE TOTALE CUVE ;
SURF TOTALE    CUVE            2.0009E+01
```

```
←/   CALCUL D'ECHAUFFEMENT DU REFRIGERANT   /

←CALCULER PERTES TOTALES T @@TR ;
FF                              MESS6
FF                              MESS6
PERTES TOT     TR                3.4333E+03

←CAL ECHAUFFEMENT MOYEN REF ;
FF                              MESS6
FF                              MESS6
ECHAUFF MOY    REF               3.8868E+01

←CAL ECH MAX REF ;
FF                              MESS6
FF                              MESS6
ECHAUFF MAX    REF               4.8584E+01

←/   CALCUL DES ECHAUFFEMENTS DANS LES GALETTES   /

←ENT CONSTANTE ECHAUFFEMENT SUPERFICIEL  REF 536E-4 ;
OK

←ENT CONDUCTIBILITE THERMIQUE COTON 0.2 ;
OK

←ENT CON THE VERNIS 0.2 ;
OK

←ENT CON THE PAPIER 0.2 ;
OK

←SAUVER ;
*
/*
FAITES RETOUR CHARIOT

←
//PROJET CONSERVE

←TRACE NON ;
OK

←CALCULER ECHAUFFEMENT MAXIMAL GAL1 ;
FF                              MESS6
ECHAUFF MAX    GAL1              2.1377E+01

←CAL ECH MAX GBT ;
ECHAUFF MAX    GBT               1.7015E+01
←VARIATION ECH MAX GAL1 INTENSITE SECONDAIRE GLOBALE TR IMPRIMER ;
FF                              MESS6
VALEUR MIN ?

←300
VALEUR MAX ?

←600
INTENS SECON TR                 ECHAUFF MAX  GAL1
   3.0000E+02                      8.9967E+00
   3.6000E+02                      1.2243E+01
   4.2000E+02                      1.5896E+01
   4.8000E+02                      1.9943E+01
   5.4000E+02                      2.4370E+01
   6.0000E+02                      2.9167E+01

←ARR;
R; T=10.96/13.09 08:12:13
```

CONCLUSION

Depuis une dizaine d'années, de nombreuses expériences concernant la pédagogie par ordinateur ont été réalisées, dans le monde entier. Bien que beaucoup d'entre elles se soient révélées décevantes, il demeure néanmoins que les quelques timides succès, enregistrés par cette pédagogie, attestent que l'ordinateur doit être considéré comme un puissant outil d'enseignement, même s'il est plus difficile à maîtriser que les autres, en raison, précisément, de sa puissance.

D'autre part, les échecs essuyés par nombre des expériences précédentes ne se sont pas avérés totalement inutiles. Ils ont, en effet, permis d'établir, dans le domaine de la pédagogie par ordinateur, plusieurs règles fondamentales de travail. Ainsi, la simple adaptation à l'ordinateur d'une pédagogie précédemment édifiée sur un autre support conduit très souvent à employer l'ordinateur dans la réalisation de tâches qui ne lui conviennent pas ; l'ordinateur est alors mal utilisé et, généralement, l'expérience correspondante ne constitue pas une réussite. Par ailleurs, dans ce type d'application, l'ordinateur est un outil au service de la pédagogie, à savoir que des techniques suffisamment efficaces, concernant la programmation ou le "hardware", doivent être développées dans ce sens, mais, qu'inversement, un perfectionnement technique, qui ne serait pas fondé sur une idée d'application pédagogique, devient, dans ce domaine, un simple "gadget". Dans ce but, une parfaite collaboration est nécessaire entre l'informaticien et l'enseignant. Enfin, le système pédagogique ainsi conçu ne doit pas être figé, et dans le but de le modifier et de le rendre plus adequat, il est nécessaire d'évaluer complètement la réaction des élèves à cette pédagogie.

Dans ce cadre de la pédagogie par ordinateur, le système ESPACE dont nous venons de présenter les principaux aspects, a pour objectif essentiel l'amélioration de l'environnement pédagogique des projets d'élèves ingénieurs.

Initialement, nous avons limité notre travail aux projets de machines électriques ce qui nous a amenés à analyser les caractéristiques générales de ces projets. De cette analyse, nous avons essayé de dégager leur nature fondamentale : ce sont des projets fermés, c'est-à-dire à primitive connue à l'avance ; nous en avons déduit les types de problèmes qui se posent lors de la conception de tels projets et la méthode générale à utiliser pour les résoudre. Cette dernière présente trois aspects fondamentaux : elle est itérative, hiérarchisée et associative.

Nous avons fait cette analyse dans le cas précis des projets de machines électriques, cependant elle est généralisable à la plupart des projets d'ensembles physiques fermés et elle reste aussi partiellement valable dans le cas où ces projets sont ouverts.

Connaissant les principales caractéristiques des projets sur lesquels ont à travailler les élèves ingénieurs, nous avons précisé leurs multiples fonctions formatrices dont la principale est le développement de l'esprit de synthèse chez l'élève ; sur un sujet donné, ce dernier concrétise les connaissances scientifiques et les méthodes qui lui ont été enseignées, tout en faisant intervenir ses qualités personnelles.

Le rôle de l'environnement pédagogique du projet est d'intégrer ce dernier dans le reste de l'enseignement afin qu'il assume au mieux ses fonctions formatrices. Si l'environnement actuel est satisfaisant du point de vue de sa structure générale, il nous a paru présenter de graves défauts en ce qui concerne les outils de travail offerts aux étudiants. Ces outils, d'emploi malaisé , détournent l'élève du but profond du projet qui est de le conduire à mettre de l'ordre dans ses connaissances en structurant ces dernières. Nous en avons déduit la nécessité de mettre à la disposition des élèves un système informatique d'assistance à la conception de leur projet. Plus qu'un simple outil, ce système constitue un partenaire de travail pour

l'élève qui, néanmoins, conserve totalement son pouvoir de décision. Nous avons laissé, à l'ordinateur, la partie du travail qu'il réalise le mieux, à savoir les calculs rapides, la présentation claire des résultats et l'analyse d'un langage de commandes à syntaxe réduite. En travaillant suivant une méthode d'essai-erreur dont l'emploi est facilité par la nature du système, l'élève peut découvrir par lui-même les principes de conception et les relations principales entre les différentes parties du projet, ce qui le conduit à structurer l'ensemble de ses connaissances, les rendant par là même mieux utilisables.

La réalisation du système ESPACE nous a dons posé des problèmes relevant de plusieurs techniques : électrotechnique, informatique et pédagogie. Pour assurer une meilleure intéraction entre ces techniques, nous nous sommes efforcés, une fois les objectifs pédagogiques définis, de mener de front la résolution des problèmes posés par chacune des disciplines précédentes.

Le premier problème à résoudre a été celui de la représentation, en mémoire de l'ordinateur, des informations concernant les machines électriques. Cette représentation devait à la fois satisfaire les impératifs de description des machines, être suffisamment souple et dynamique pour être satisfaisante au point de vue pédagogique et, enfin, ne pas poser de difficulté de programmation insurmontable.

A cette représentation, nous avons appliqué les algorithmes nécessaires à la construction et au calcul d'un projet. La principale propriété de ces algorithmes est d'être capables de se composer pour satisfaire toutes les requêtes de l'élève. Pour cela, nous avons dû, d'une part, utiliser plusieurs méthodes de composition des algorithmes et, d'autre part, séparer les caractéristiques en hypothèses et conséquenses. L'exécution de ces algorithmes permet de montrer rapidement à l'élève les effets de ses décisions ou de le confronter immédiatement avec ses erreurs.

L'ensemble formé par la représentation des informations et des algorithmes constitue le modèle potentiel du projet. Un ensemble de communications commodes permet une intéraction efficace entre l'élève et ce modèle. Nous mettons à la disposition de l'élève un langage de commandes simple propre à chaque type de machine électrique. Par ailleurs, nous avons essayé d'améliorer la présentation des résultats par utilisation de terminaux graphiques. Ces communications permettent à l'élève de communiquer aisément ses requêtes au système et d'en évaluer rapidement les conséquences.

L'étude simultanée de problèmes électrotechniques, informatiques et pédagogiques nous a amenés à construire une réalisation du système ESPACE de nature empirique, mais nous permettant de débuter, néanmoins, un travail d'expérimentation pédagogique. Pour faciliter l'intégration de ce système dans l'enseignement actuel et pour permettre une meilleure expérimentation, nous avons rédigé, en association avec le sous-système existant, un manuel de construction et de calcul de transformateurs orienté vers l'utilisation du sous-système, et qui en constitue le manuel d'utilisation.

La réalisation actuelle du système n'a pas encore été éprouvée sérieusement : les quelques essais réalisés ne l'ont pas été sur un échantillon approprié d'élèves. Nous ne pouvons donc pas être sûrs que les objectifs soient correctement réalisés par le système actuel. Ainsi, la prochaine étude à réaliser sur ce système est une évaluation complète et systématique par une expérimentation sur un échantillon complet d'élèves ingénieurs électrotechniciens. Cette étude est, du reste, déjà commencée. Elle consiste en une analyse méthodique de toutes les propriétés pédagogiques du système dans le but d'établir un nouvel ensemble de propriétés constituant les fondements d'un prochain système. Elle doit aussi nous permettre d'étendre le champ d'utilisation du système actuel à d'autres enseignements techniques (recyclage, IUT...).

D'autre part et parallèlement à l'étude précédente, les principes de réalisation du système doivent être approfondis sur le plan théorique, afin d'en améliorer les performances, d'en permettre l'implantation sur un ordinateur de taille plus réduite, et de développer les programmes d'assistance à la réalisation d'un sous-système. Le but essentiel de cette étude est de rendre le système plus accessible tant aux élèves qu'aux professeurs.

Enfin, avec l'aide d'élèves ingénieurs électrotechniciens, nous commençons l'étude de deux nouveaux sous-systèmes, l'un relatif aux réseaux de transports d'énergie électrique, l'autre aux machines asynchrones. Cette étude doit nous conduire à vérifier et à étendre les principes de réalisation d'un sous-système déjà établis. Nous pensons, aussi, que la multiplicité des sous-systèmes intégrés dans un ensemble unique ayant une forme d'accés similaire pour chacun d'eux, est un facteur essentiel de la réussite padagogique du système ESPACE.

ANNEXE A - METHODES DE COMPOSITION DES ALGORITHMES

La programmation des algorithmes du modèle potentiel est réalisée en utilisant un langage évolué qui sera à l'avenir FORTRAN. Les algorithmes de base sont réunis en un nombre fini de procédures élémentaires. Une procédure élémentaire peut contenir plusieurs algorithmes de base. Ainsi, une première composition des algorithmes de base est réalisée lors de la programmation de ces procédures.

Ces procédures peuvent s'appeler soit directement grâce à l'instruction CALL, soit par l'intermédiaire d'une pile contenant des codes de procédures.

Nous utilisons la première de ces deux méthodes pour constituer un ensemble d'algorithmes duaux, à savoir que, lorsque nous composons un algorithme d'action, nous composons aussi l'algorithme du contrôle associé à cette action.

La formation de ces algorithmes duaux, résultant de la composition d'algorithmes de base au sein de procédures et de la composition de ces procédures par l'utilisation de l'instruction CALL, est donc entièrement réalisée au niveau de la programmation.

Ces algorithmes duaux peuvent, à leur tour, être eux-mêmes composés par utilisation de la pile. Ce deuxième mode de composition présente l'inconvénient d'être beaucoup moins rapide que le premier, car il nécessite le retour au programme exécutif qui, après avoir décodé la case de la pile suivant celle de l'algorithme précédemment exécuté, utilise l'instruction CALL pour appeler l'algorithme correspondant.

Cependant, ce deuxième mode de composition présente les avantages suivants :

1°) Il permet au programmeur du modèle potentiel d'écrire la programmation en plusieurs segments indépendants communicant entre eux par la pile. Cela facilite la programmation, sa correction et la détection des erreurs.

2°) La composition des algorithmes uniquement par l'instruction CALL peut être si complexe qu'il devient impossible d'éviter à l'écriture des programmes qu'un même algorithme appliqué au même composant s'exécute plusieurs fois pour une même requête de l'élève. Le sous-programme permettant la mise à jour de la pile n'ajoute un nouveau code à la pile que s'il n'existe pas déjà dans la pile associé au même composant (dont l'adresse se trouve dans la deuxième colonne de la pile). Ainsi, nous pouvons limiter considérablement l'exécution multiple d'algorithmes lors d'une même requête, ce qui permet un gain de temps appréciable.

3°) Lors de l'exécution d'une requête, le contrôle et l'action sont séparés. Ainsi, la structure des réalisations doit être examinée deux fois, une pour les vérifications, l'autre pour l'action.

La composition d'algorithmes duaux par l'intermédiaire de la pile permet d'éviter partiellement cette perte de temps. Nous allons le montrer sur un exemple. Soient A1, A2 et A3, trois algorithmes d'action et C1, C2 et C3, les trois algorithmes de contrôle duaux. Nous donnons le même code à deux algorithmes duaux, soit, par exemple, 001 à A1 et C1, 002 à A2 et C2 et 003 à A3 et C3, soit une requête de l'élève dont l'interprétation passe le code 001 au programme exécutif par l'intermédiaire de la pile. Imaginons le travail du programme exécutif :

- Il lit dans la pile le code 001 et commence par lancer le programme de contrôle associé C1. Ce programme examine la structure des réalisations et détermine que pour être correctement exécuté A1 doit être précédé par A2 et A3. Il ajoute alors les codes 002 et 003 à la pile et rend le contrôle au programme exécutif.

- Celui-ci constate que le code 001 est suivi par le code 002. Il appelle donc le programme de controle C2, puis le programme de contrôle C3.

- Le programme exécutif constate qu'il n'y a plus de code dans la pile après 003. Les contrôles sont donc terminés. S'il n'y a pas eu d'erreur de la part de l'élève, l'exécution de l'action doit commencer.

- Le programme exécutif doit lancer d'abord les exécutions de A3 et A2 pour qu'elles soient réalisées avant A1.

- Enfin, le programme exécutif lance l'exécution de A1 ce qui termine l'exécution de la requête de l'élève par le système.

Ainsi, le programme exécutif doit parcourir la pile de bas en haut lors du contrôle et de haut en bas pour l'action. D'autre part, en construisant la pile des codes des algorithmes et, parallèlement, celle des adresses des réalisations associées aux algorithmes, le contrôle participe ainsi à la composition des algorithmes de calcul.

L'avantage n'est pas seulement un gain de temps à l'exécution, mais aussi une diminution du travail de programmation.

Le travail effectué par le programme exécutif est représenté par l'organigramme de la figure 25.

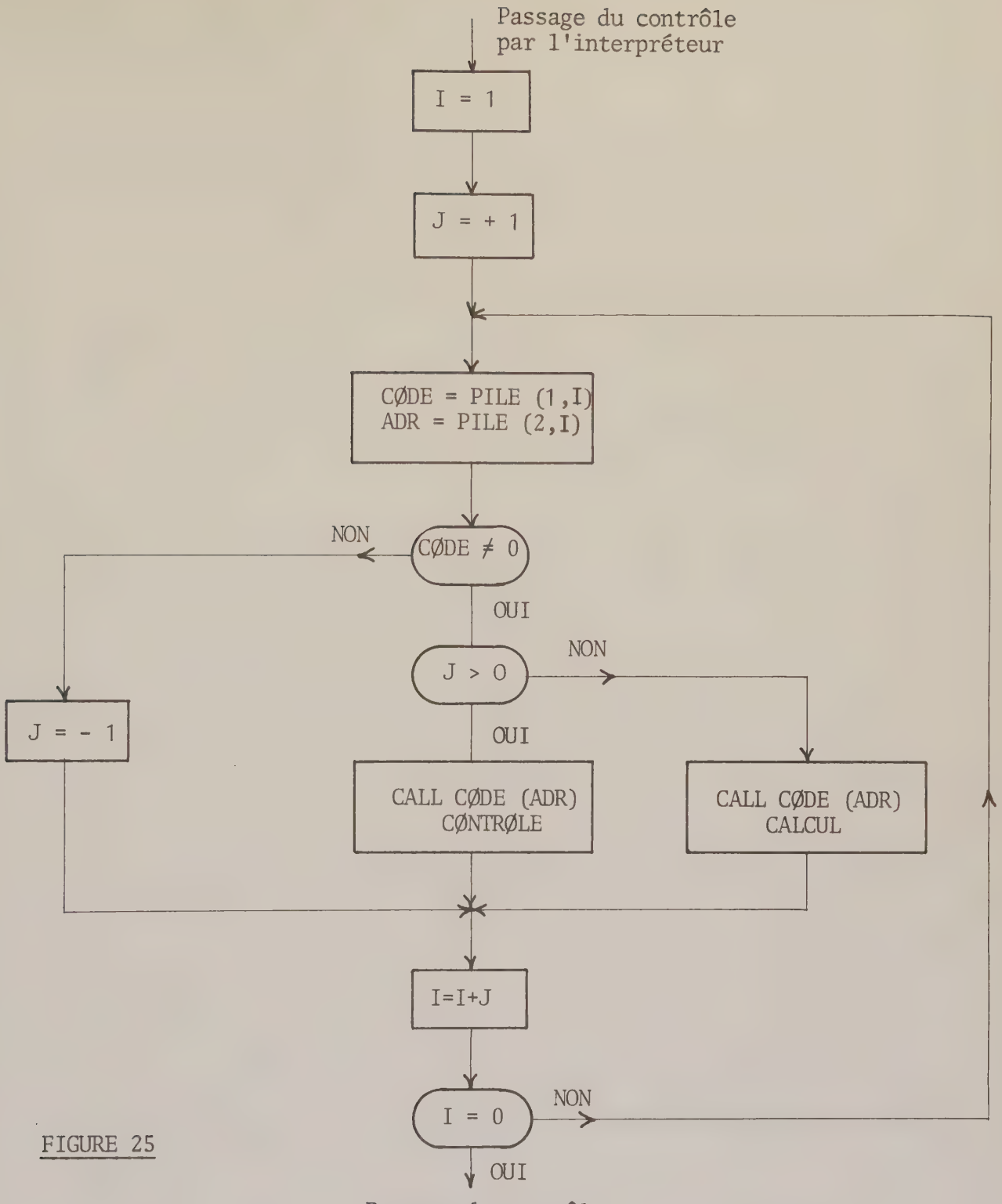


FIGURE 25

Ainsi, les différentes méthodes de composition des algorithmes de base apportent plus de souplesse au travail de programmation et permettent d'améliorer les performances du système.

ANNEXE B - PROGRAMMES D'APPLICATION GRAPHIQUE UTILISES PAR LA VERSION ACTUELLE DU SYSTEME ESPACE

Les programmes d'application graphique utilisés par la version actuelle du système ESPACE sont du nombre de 9. Deux d'entre eux sont écrits en Assembleur 360 et constituent l'interface de transmission des caractères entre les autres programmes écrits en PL/I et un terminal à écran de visualisation graphique TEKTRONIX T 4 010.

Ce dernier est un terminal à tube mémoire, ne nécessitant donc pas un rafraîchissement continu de l'image. Il peut travailler avec les trois modes de fonctionnement suivants :

1°) Le mode alphanumérique,

2°) Le mode sortie graphique,

3°) Le mode entrée graphique.

Nous n'utilisons, actuellement, dans le système ESPACE, que les deux premiers de ces modes.

Les deux procédures écrites en Assembleur 360 sont TEKOUT et TEKTRA.

TEKOUT se charge de la transmission de caractères de contrôle du terminal assumant les fonctions telles que le passage d'un mode à un autre.

TEKTRA transforme les coordonnées écran d'un point (de 0 à 1 023 pour X et de 0 à 780 pour Y) en une suite de 4 octets transmis au terminal. Si ce point est le premier transmis après être passé en mode graphique, il y a déplacement du curseur graphique sans tracé sur l'écran ; dans le cas contraire, un vecteur est tracé entre la position précédente du curseur et cette nouvelle position.

Les procédures écrites en PL/I commandent les appels à ces deux procédures Assembleur. Ce sont :

TKPLINI, qui permet de définir, sur l'écran, un rectangle de travail dans lequel seront tracées les courbes ;

TKPLMAR, qui permet de modifier la marge à l'intérieur de ce rectangle ;

TKPLTAB, qui permet de tracer une suite de vecteurs dont les extrémités sont connues en coordonnées écran ;

TKPLTAB, qui permet de tracer à l'intérieur du rectangle de travail une suite de vecteur dont les extrémités sont connues en coordonnées réelles ; cette procédure transforme ces coordonnées pour optimiser l'utilisation de la place dans le rectangle compte tenu de la marge ;

TKPLAXE, qui permet de tracer automatiquement les axes et les graduations en y indiquant les échelles ; cette procédure est appelée par la précédente ;

TKPLPC, qui permet de déplacer le curseur alphanumérique au point voulu de l'écran ;

TKPLFTR, qui permet d'envoyer, à la fin d'un tracé, le curseur alphanumérique au bas de l'écran.

ANNEXE C - EXEMPLES D'ENTITES ET DE STRUCTURE DE REALISATIONS : LE CIRCUIT MAGNETIQUE D'UN TRANSFORMATEUR

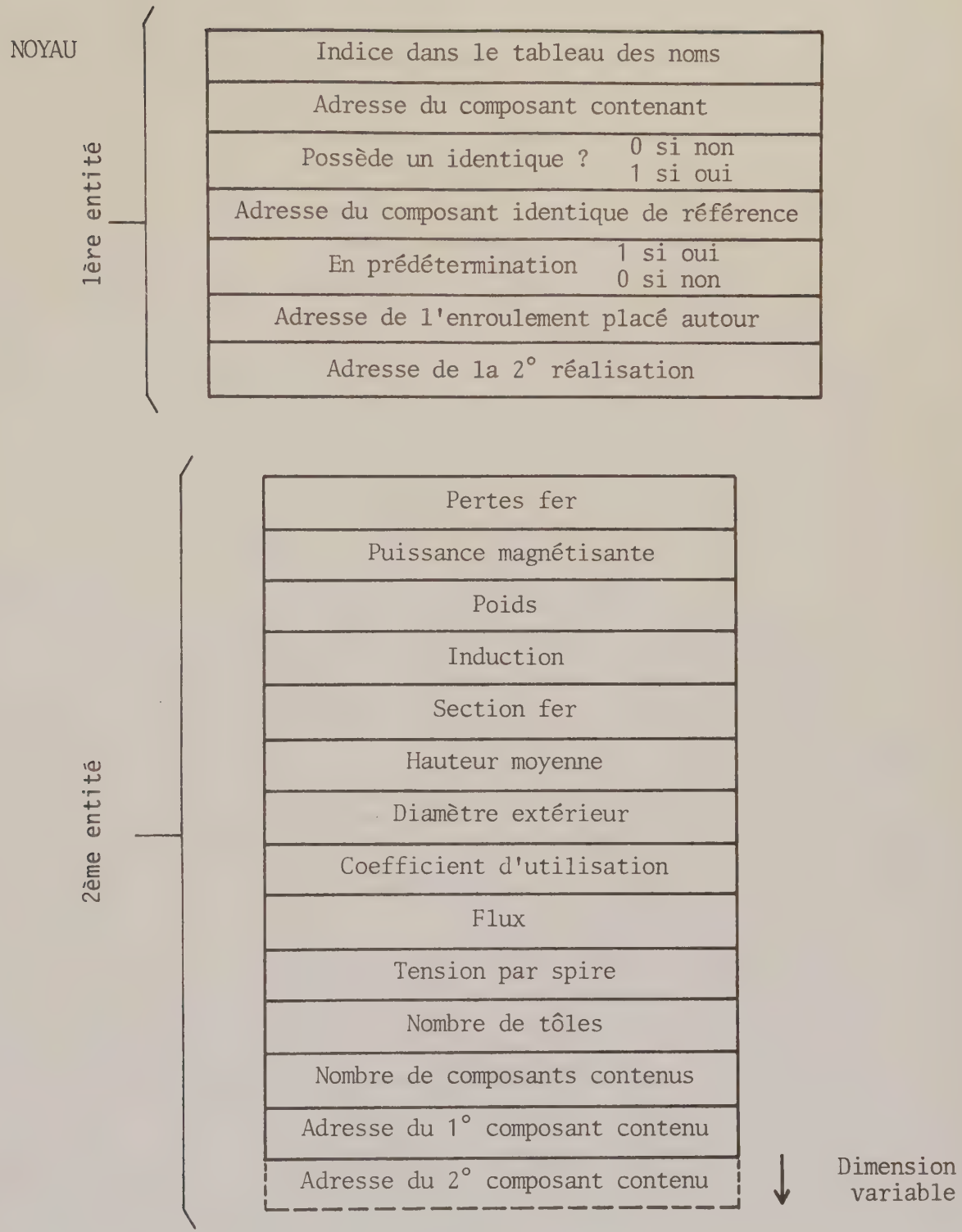
I - DESCRIPTION DES ENTITES

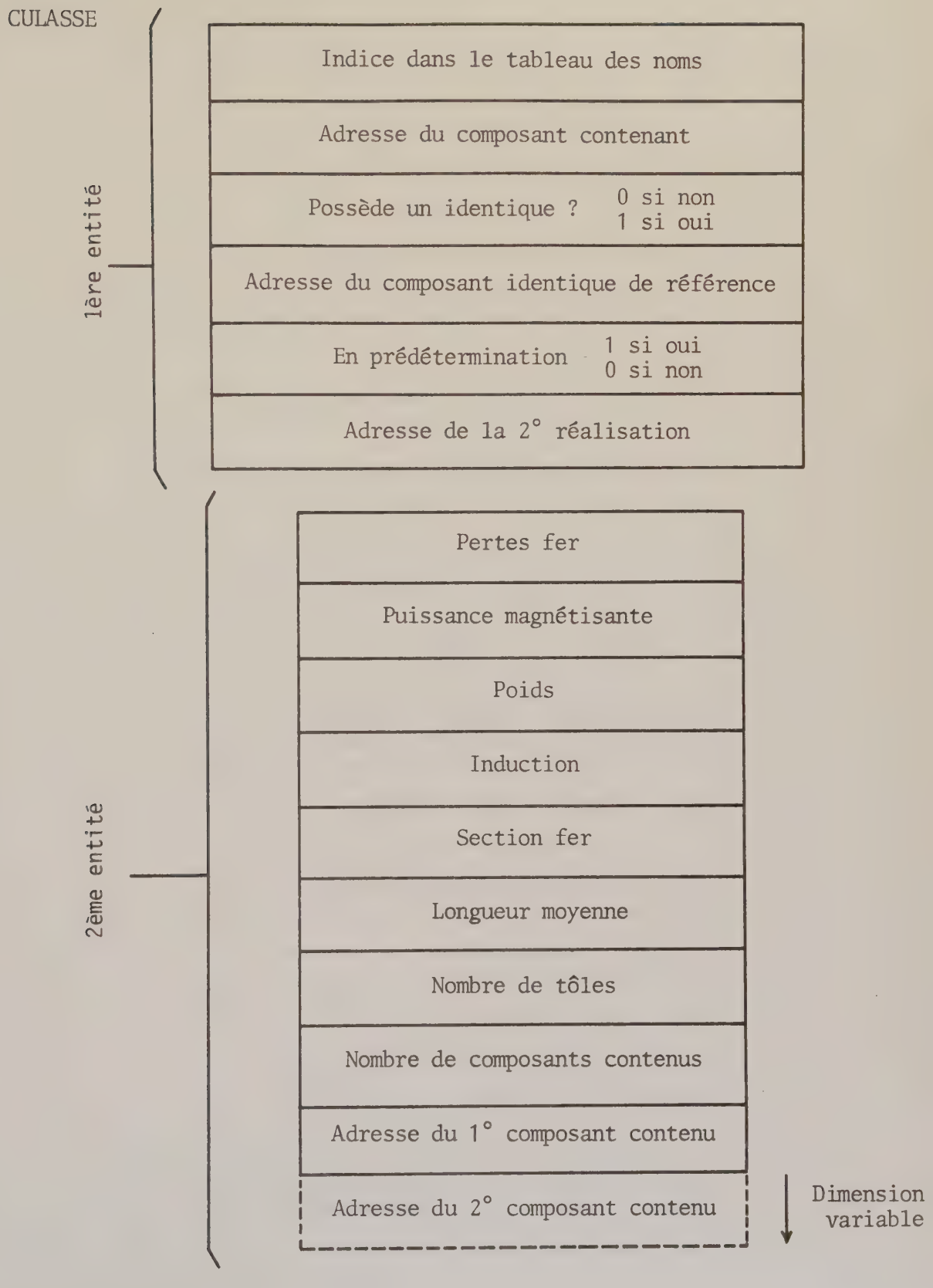
Nous considèrerons les entités symbolisant les composants CIRCUIT MAGNETIQUE, NOYAU, CULASSE et GRADIN, et le matériau TOLE.

CIRCUIT MAGNETIQUE

Indice dans le tableau des noms
Adresse du composant contenant
Adresse du matériau
En prédétermination — 1 si oui, 0 si non
Joints — 2 si 90°, 3 si 45°
Pertes fer
Puissance magnétisante
Poids
Nombre de composants contenus
Adresse du 1° composant contenu
Adresse du 2° composant contenu

↓ Dimension variable


NOYAU
1ère entité
Indice dans le tableau des noms
Adresse du composant contenant
Possède un identique ? 0 si non 1 si oui
Adresse du composant identique de référence
En prédétermination 1 si oui 0 si non
Adresse de l'enroulement placé autour
Adresse de la 2° réalisation
2ème entité
Pertes fer
Puissance magnétisante
Poids
Induction
Section fer
Hauteur moyenne
Diamètre extérieur
Coefficient d'utilisation
Flux
Tension par spire
Nombre de tôles
Nombre de composants contenus
Adresse du 1° composant contenu
Adresse du 2° composant contenu
Dimension variable


CULASSE
1ère entité
Indice dans le tableau des noms
Adresse du composant contenant
Possède un identique ? 0 si non 1 si oui
Adresse du composant identique de référence
En prédétermination 1 si oui 0 si non
Adresse de la 2° réalisation
2ème entité
Pertes fer
Puissance magnétisante
Poids
Induction
Section fer
Longueur moyenne
Nombre de tôles
Nombre de composants contenus
Adresse du 1° composant contenu
Adresse du 2° composant contenu
Dimension variable

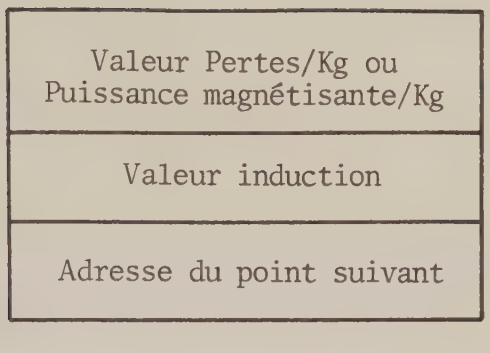
GRADIN

Indice dans le tableau des noms
Adresse du composant contenant
Adresse du gradin inséré
Adresse du gradin qui insère
Largeur
Nombre de tôles

TOLE

Indice dans le tableau des noms
Nombre de points de la fonction Pertes/Kg (induction)
Nombre de points de la fonction Puissance magnétisante/Kg (induction)
Epaisseur de fer
Epaisseur isolée
Foisonnement
Densité
Adresse du 1° point de la fonction Pertes/Kg (induction)
Adresse du 1° point de la fonction Puissance magnétisante/Kg (induction)

POINT



II - EXEMPLE DE STRUCTURE DE REALISATIONS

Soit la séquence de commandes suivante :

```
1  - CREER CIRCUIT MAGNETIQUE CM ;
2  - CREER NOYAU N1 ;
3  - IDENTIFIER N2 N1 ;
4  - IDENTIFIER N3 N1 ;
5  - CREER CULASSE C1 ;
6  - IDENTIFIER C2 C1 ;
7  - ELEMENT CM N1 ;
8  - ELEMENT CM N2 ;
9  - ELEMENT CM N3 ;
10 - ELEMENT CM C1 ;
11 - ELEMENT CM C2 ;
12 - MATERIAU TOLE T ;
13 - TOLE T CM ;
14 - CREER GRADIN G1 ;
15 - CREER GRADIN G2 ;
16 - CREER GRADIN G3 ;
17 - ELEMENT N1 G1 ;
18 - ELEMENT N1 G2 ;
19 - ELEMENT C1 G3 ;
20 - INSERER G1 G2 ;
21 - FONCTION PERTES KILO T 0.55 INDUCTION 1 ;
```

Cette séquence de commandes développe en mémoire une structure de réalisations représentées ci-après. A chaque liaison, nous avons associé le numéro de la commande qui la crée.

Remarque :

Sur la représentation de la figure 26, une composante inconnue est indiquée par - 1.

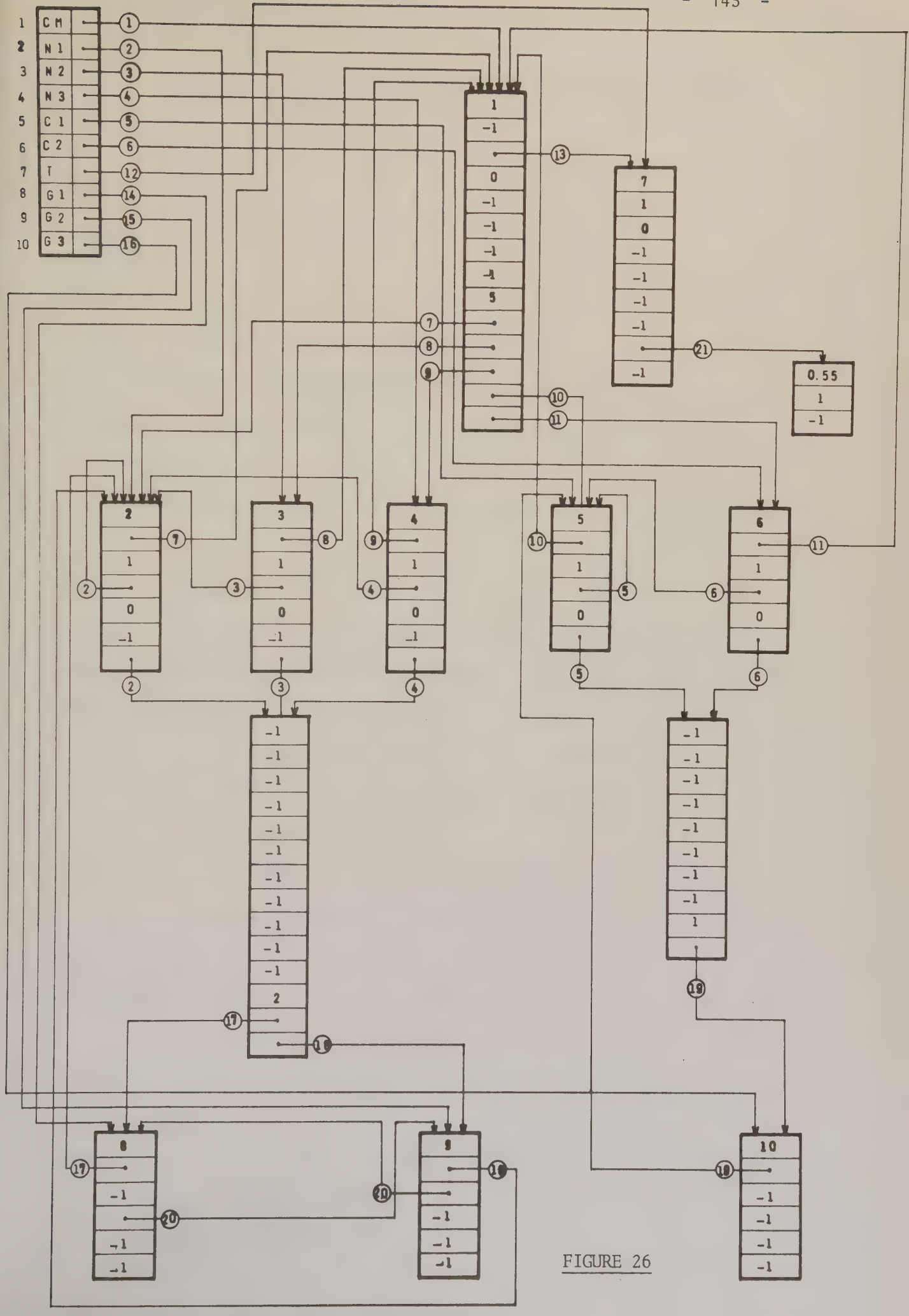

1 CM
2 N1
3 N2
4 N3
5 C1
6 C2
7 T
8 G1
9 G2
10 G3
1
-1
0
-1
-1
-1
5
7
1
0
-1
-1
-1
-1
-1
0.55
1
-1
2
3
4
5
6
-1
2
0
3
4
1
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21

FIGURE 26

ANNEXE D - EXEMPLE DE CREATION D'UN LANGAGE DE COMMANDES

```
EXECUTION BEGINS...
DEBUT DU CHARGEMENT:
NOM DU FICHIER LANGAGE ?
-CREATER
NOM DE L'APPLICATION ?
-CREATER
DEBUT DE L'APPLICATION:'CREATER '

-/  LES COMMENTAIRES SONT PLACES ENTRE SLASH  /

-/ DANS CET EXEMPLE NOUS ALLONS GENERER UN LANGAGE REUNISSANT LES

-COMMANDES ''CREER'' , ''TOLE'' , ET ''FONCTION'' DU LANGAGE RELATIF

-AU TRANSFORMATEUR . /

-/  LES 3 PREMIERES LETTRES D'UN MOT CLE SUFFISENT A LE CARACTERISER./

-

-/      COMMANDE CREER          /

-NDC CRE ; /AJOUTE ''CRE'' A LA TABLE DES NOMS DE COMMANDES/

-MOD TRA ;/APRES LE NOM DE COMMANDE ''CREER'' , IL SERA POSSIBLE DE

-RENCONTRER LE MODIFIEUR TRANSFORMATEUR /

-PAR ALP 1 ; /CE MODIFIEUR DEVRA ETRE SUIVI D'UN PARAMETRE

-             ALPHANUMERIQUE QUI SERA RANGE PAR L'INTERPRETEUR

-              DANS PARALP(1)/

-EXE 1 ; / LE CODE 1 SRERA ALORS PLACE DANS LA PILE DES CODES DE

-         DEPROCEDURES PASSEE AU PROGRAMME EXECUTIF /

-MOD CIR ; /AUTRE MODIFIEUR POSSIBLE APRES ''CREER''/

-MOD MAG NIV 2 ;/MODIFIEUR POSSIBLE APRES ''CIRCUIT''. ''NIV 2''

-              INDIQUE SON NIVEAU DANS L'ARBRE REPRESENTANT LA

-              COMMANDE . ''NIV 1'' CONSTITUE L'OPTION STANDARD/

-PAR ALP 1 ; EXE 2 ;

-MOD NOY ; PAR ALP 1 ; EXE 3 ;

-MOD CUL ; PAR ALP 1 ; EXE 5 ;

-MOD BOB ; PAR ALP  1 ; EXE 6 ;
```

```
←MOD GRA ; PAR ALP 1 ; EXE 7 ;
←MOD ENR ; PAR ALP 1 ; EXE 8 ;
←MOD EMP ; PAR ALP 1 ; EXE 9(;
←MOD GAL ; PAR ALP 1 ; EXM 10 ;
←MOD SPI ; PAR ALP 1 ; EXE 11 ;
←MOD COU ; PAR ALP 1 ; EXE 12 ;
←MOD INT ; PAR ALP 1 ; EXE 13 ;
←MOD REF ; PAR ALP 1 ; EXE 12 ;
←MOD CUV ; PAR ALP 1 ; EXE 15 ;
←FIN ;/INDIQUE LA FIN DE LA DESCRIPTION DE LA COMMANDE /
←
←/        COMMANDE TOLE          /
←NDC TOL ;
←PAR ALP 1 ; PAR ALP 2 ;/2 PARAMETRES ALPHANUMERIQUES DEVRONT ETRE
←                        RENCONTRES APRES ''TOLE'' . LE PREMIER EST RANGE
←                        DANS PARALP(1) , LE SECOND DANS PARALP(2) /
←EXE 102 , 103 ;
←FIN ;
←
←/          COMMANDE FONCTION              /

NDC FON ;
←MOD PER ; EXE 211 ;
←BRA ETQ 1 ;/PERMET DE CE BRANCHER A   ''ETQ 1'' /
←MOD PUI ; MOD MAG NIV 2 ; EXE 212 ; BRA ETQ 1 ;
←BLO ETQ 1 NIV 1 ;/DEFINIT UN BLOC ''ETQ 1'' DE NIVEAU 1 /
←BRA INC ETQ 2 ; MOD PAR NIV   2 ETQ 2 ;
←/ LES 2 COMMANDES  PRECEDENTES RENDENT LE MODIFIEUR PAR IGNORABLE/
←MOD KIL NIV 3 ; BRA ETQ 3 ;
←BLO ETQ 3 NIV 1 ; BRA INC ETQ 4 ;
```

```
←PAR ALP     1 ; PAR FLO 1 ;
←/ LE PARAMMTRE ALPHANUMERIQUE DOIT ETRE SUIVI PAR UN PARAMETRE REEL
←QUI SERA RANGE DANS PARFLO(1) /
←MOD IND NIV 2 ETQ 4 ;/''IND '' EST IGNORABLE GRACE A  LA COMMANDE
←PRECEDENTE ''BRA INC ETQ 4'' /
←PAR FLO 2 ;
←FIN ;
←
←
←REC NDF ESSAI ; / RECOPIE LA CODIFICATION DU LANGAGE DANS LE FICHIER DE
←                  NOM ''ESSAI'' /
←STO ; /TERMINE L'UTILISATION DU PROGRAMME   GENERATEUR /
E(01000); T=3.90/6.29 08:25:56
```

```
EXECUTION BEGINS...
DEBUT DU CHARGEMENT:
NOM DU FICHIER LANGAGE ?
←ESSAI
NOM DE L'APPLICATION ?
←TEST
DEBUT DE L'APPLICATION:'TEST     '

←

←/  GRACE A UN PROGRAMME DE TEST NOUS POUVONS VERIFIER LE LANGAGE ''ESSAI''

←    PRECEDEMMENT GENERE .../

←

←/       EXEMPLES DE CREER       /

←

←CREER NOYAU N1 ;
********DEBUT COMMANDE********
PARAMETRE(S) ALPHANUMERIQUE(S):
PARALP(         1)='N1       '

EXECUTER         3
******** FIN  COMMANDE********


←CREER CIRCUIT MAGNETIQUE ;

''? , CODE=1003
CREER CIRCUIT MAGNETIQUE ;
**************************

←CRE CIR MAG CM ;
********DEBUT COMMANDE********
PARAMETRE(S) ALPHANUMERIQUE(S):
PARALP(         1)='CM       '

EXECUTER         2
******** FIN  COMMANDE********
```

```
←

←/        EXEMPLE DE TOLE     /

←

←TOLE T CM ;
********DEBUT COMMANDE********
PARAMETRE(S) ALPHANUMERIQUE(S):
PARALP(         1)='T        '
PARALP(         2)='CM       '

EXECUTER       102
EXECUTER       103
******** FIN  COMMANDE********


←

←

←/        EXEMPLE DE FONCTION       /

←FONCTION PERTES PAR KILO T 0.55 INDUCTION 1 ;
********DEBUT COMMANDE********
PARAMETRE(S) ALPHANUMERIQUE(S):
PARALP(         1)='T        '

PARAMETRE(S) FLOTTANT(S):
PARFLO(         1)= 5.499999999999999E-01
PARFLO(         2)= 1.000000000000000E+00

EXECUTER       211
******** FIN  COMMANDE********


←FONCTION PERTES KILO T 0.55 1 ;
********DEBUT COMMANDE********
PARAMETRE(S) ALPHANUMERIQUE(S):
PARALP(         1)='T        '

PARAMETRE(S) FLOTTANT(S):
PARFLO(         1)= 5.499999999999999E-01
PARFLO(         2)= 1.000000000000000E+00

EXECUTER       211
******** FIN  COMMANDE********
```

ANNEXE E - EXTRAIT DES CODES DES MESSAGES ET DES ERREURS

Outre la réponse normale à une commande (résultats de calcul, par exemple), des messages de deux sortes peuvent être envoyés à l'utilisateur par le système ESPACE. Ce sont :

1°) Les messages proprement dits. Ils ne correspondent pas véritablement à une erreur de la part de l'élève. Par ces messages, il peut être indiqué à l'utilisateur les restrictions du système ou la réalisation automatique par ce dernier d'actions évidentes. Ces messages permettent aussi d'envoyer quelques observations qui peuvent être utiles à l'élève.

2°) Les erreurs. Les messages d'erreurs sont envoyés par les programmes de contrôle des actions à entreprendre. Une erreur interdit automatiquement la réalisation de ces actions.

Les messages se présentent sous forme codée. Nous donnons ci-dessous un extrait des codes utiles à la compréhension de certains exemples donnés précédemment.

Codes des messages

MESS1 - a1 a2 MESS1

Le premier composant a1 contient obligatoirement le deuxième a2. La liaison a été créée automatiquement.

MESS2 - a1 a2 MESS2

Le matériau a2 était déjà affecté au composant a1. Le nouveau matériau remplace l'ancien.

MESS4 - Mise à jour automatique du type du conducteur à "ROND".

MESS5 - Mise à jour automatique du type du conducteur à "MEPLAT".

MESS6 - Les pertes supplémentaires sont considérées comme négligeables par le système pour les conducteurs à section ronde.

MESS7 - Restriction du système : ce dernier accepte les enroulements de type alterné, mais alors l'enroulement ne doit contenir qu'un seul empilage.

MESS8 - a MESS8

Les empilages contenus par l'enroulement a ont des hauteurs assez nettement différentes. Le calcul de l'inductance de fuite est effectué, mais les hypothèses qui y sont faites sont mal vérifiées. Les résultats qui suivent peuvent donc être erronés.

MESS9 - a MESS9

Le rapport de la hauteur de l'enroulement a à son diamètre extérieur est trop faible. Le calcul de l'inductance de fuite est effectué, mais les hypothèses qui y sont faites sont mal vérifiées. Les résultats qui suivent peuvent donc être erronés.

MESS10 - a MESS10

La galette a est trop épaisse. Le calcul de l'inductance de fuite est effectué, mais les hypothèses qui y sont faites sont mal vérifiées. Les résultats qui suivent peuvent donc être erronés.

Code des erreurs

Les codes sont groupés par type d'erreur :

1°) Codes de 1 à 99 : erreur de construction du transformateur.

2°) Codes de 100 à 999 : la valeur d'une caractéristique hypothèse n'est pas connue par le système.

3°) Codes supérieurs à 999 : erreur à l'interprétation de la commande.

- ERR1 - a ERR1

  L'élément (composant ou matériau) a est inconnu.

- ERR8 - a ERR8

  Le gradin a insère déjà un autre gradin.

- ERR14 - a ERR14

  Le circuit magnétique a doit contenir 5 composants.

- ERR26 - a ERR26

  Le composant a est déjà entouré par un autre composant.

- ERR41 - a ERR41

  Le transformateur a ne contient pas de circuit magnétique.

- ERR100 - a ERR100

  La valeur de l'épaisseur de fer du matériau tôle a n'est pas connue.

- ERR103 - a ERR103

  La valeur de la densité du matériau tôle a n'est pas connue.

'XXX' - CODE = 1005

Le mot clé XXX n'existe pas ou n'est pas autorisé à cette place dans la commande.

BIBLIOGRAPHIE

(1) - J. R. ABRIAL, J. BAS, G. BEAUME, G. HENNERON, R. MORIN, G. VIGLIANO - Projet SOCRATE : Spécifications générales - Communication I. M. A. G., Août 1970.

(2) - C. BELLISSANT - Conception et compilation d'un langage pour l'écriture de cours - Thèse de 3ème Cycle - Grenoble, Mars 1970.

(3) - B. J. BERMINGTON - Man-Machine interaction in the design of rotating electrical machines - Proceedings of the SHARE-ACM-IEEE - Design Automation Workshop - June 8-12 1969 - Miami Beach, FB.

(4) - H. BOYER, N. NORBERT, R. PHILIPPE - Construction du matériel électrique - Tome III - Edition de la Capitelle, 1966.

(5) - C. BRACCHI, M. SOMALVICO - An interactive software for computer aided design : an application to circuit project. Communications of the ACM. Vol 13, n° 9 - September 1970.

(6) - L. O. CHUA - On the use of interactive computer graphics for teaching selected topics from non linear electronic circuits - IEEE Tr. on Education - February 1972.

(7) - R. G. COLCLASER - The development of design capability in young engineers - IEEE Transactions on Education. Vol. E13 - July 1970.

(8) - S. A. COONS - An outline of the requirements for a computer-aided design system - Proceedings. Spring Joint Computer Conference, 1963.

(9) - DERTOUZOS - On line circuit design - Proceedings of the IEEE, May 1967.

(10) - DORMONT - Calculs et construction des machines électriques statiques - Transformateurs - Cours de l'Ecole Supérieure d'Electricité.

(11) - D. S. EVANS, J. KATZNELSON - Data structure and man-machine communications for network problems - Proceedings of the IEEE - Vol. 55, n° 7, July 1967.

(12) - G. FAFIOTTE, R. SACCO, C. BELLISSANT - Education software : some solutions and prospects - Congrès IFIPS 1971.

(13) - O. I. FRANKSEN - Teaching the uses of digital computers at the Technical University of Denmark - AIEE Fall General Meeting - Chicago, October 1960.

(14) - O. I. FRANKSEN - Closed and open design projects in the education of engineers - IEEE Transactions on Education, March 1965.

(15) - O. I. FRANKSEN - Introducing simulation in engineering education - Electric Power Engineering Department . Technical University of Denmark - Lyngby, February 1971.

(16) - FREDERIKSEN, GUNDBERG - The design of power transformers on digital computers - An illustration of economic optimization and automatical conection of students'answers in University design projects - International Journal of Electrical Engineering Education - Vol. 6, n° 1, March 1968.

(17) - J. C. GRAY - Compound data structure for computer aided design ; a survey - Proceedings A.C.M. National Meeting, 1967.

(18) - J. C. GRAY - Fondamental concepts in Computer-aided design : storage and date structure - University of Cambridge - Department of Architecture, working paper n° 49.

(19) - J. R. HANSEN - Power system macroprogramming language : a user's manual - Electric Power Engineering Department - Technical University of Denmark - Lyngby, May 1967.

(20) - A. M. HORMANN - Man-machine planning and problem solving - International Journal of man-machine studies, Vol. 3, n° 3, July 1971.

(21) - R. C. HURST, A. B. ROSENSTEIN - Integrated computer aided design systems - AFIPS Proceedings - Fall Joint Computer Conference, November 1970.

(22) - J. C. JORDAN - ICES : Programmers Reference Manual - MIT Department of Civil Engineering Report, R 67-50, October 1967.

(23) - J. KATZENELSON - AEDNET : a simulation for non linear networks - Proc. IEEE - Vol. 54, November 1966.

(24) - KUHLMANN - Design of Electrical Apparatus - Wiley & Sons, 1950.

(25) - C. A. LANG, J. C. GRAY - ASP : a ring implemented Associative Structure Package - Communication of the ACM, August 1968.

(26) - J. C. LATOMBE, J. C. SABONNADIERE - Système informatique d'aide à la pédagogie par la conception d'ensembles techniques - Journée Académique de la recherche pédagogique dans l'enseignement supérieur - Grenoble, Juin 1972.

(27) - J. C. LATOMBE, J. C. SABONNADIERE - Elaboration d'un système informatique intégré pour l'assistance à l'enseignement et à la conception en Electrotechnique. Revue française Automatique Informatique Recherche opérationnelle B2 - 1972.

(28) - LEFAOU, ARNOULD - Simulation de circuits analogiques : le programme I.M.A.G. 2 - Electronique Industrielle - N°153- pages 45-49, 15 mars 1972.

(29) - S. B. LIPNER - A list Processing System for Engineering Application - (M. Sc. MIT 1966).

(30) - S. F. LOVE - A new methodology for the hierarchical grouping of related elements of a problem - IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, January 1972.

(31) - N. MACKENZIE, M. ERAUT, H. C. JONES - Art d'enseigner et art d'apprendre - Introduction aux méthodes et matériels nouveaux utilisés dans l'enseignement supérieur - UNESCO et Association Internationale des Universités, Paris, 1971.

(32) - D. C. MEDFORD - The quotation design of large power transformers by digital computer - CAD - IEE Conference Publication N° 51, 1969.

(33) - J. J. MELTZER- CIRCAL : An imput for non linear elements - S. M. thesis Dept. of Elec. Engineering MIT. Cambridge, May 1966.

(34) - M. D. MESAROVIC, D. MACKO, Y. TAKAHARA - Theory of hierarchical multilevel systems - Academic Press, 1971.

(35) - C. NADLER - An investigation of design methodology - Management Science - Vol. 13, June 1967.

(36) - M. D. PRINCE - Interactive Graphics for Computer Aided Design Addison Wesley, 1971.

(37) - D. ROOS - An integrated computer system for engineering problem solving - Proceedings Fall Joint Computer Conference, 1965.

(38) - D. ROOS - ICES System Design - MIT Press, 1967.

(39) - D. ROOS - ICES System : General Description - MIT Department of Civil Engineering Report R 67-49, September 1967.

(40) - D. T. ROSS, J. E. RODRIGUEZ - Theoretical foundations for a computer aided design system - Proceedings Spring Joint Computer Conference, 1963.

(41) - D. T. ROSS - Introduction to software engineering with the AED-0 language - Report ESL. R. 405. MIT. DSR - Project n° 71 425, October 1969.

(42) - J. C. SABONNADIERE - Applications des calculatrices électroniques en Electrotechnique - Thèse de 3ème Cycle - Grenoble, Juin 1965.

(43) - B. SCHUMACKER - An introduction to ICES - MIT Department of Civil Engineering Report R 67-47, September 1967.

(44) - S. M. SILVERSTONE, J. R. MUMFORD - Development of graphical communications in a Computer based transportation planning process. Search and choice in transport system planning - Vol. XI of a serie R 68-50 - MIT, June 1968.

(45) - M. E. SLOAN - Strategies in engineering problem solving - IEEE Conference on frontiers in Education - Atlanta (Ga), April 13-15 1971.

(46) - J. R. STINGER - A general data structure for on line circuit design (M. Sc. MIT, May 1968).

(47) - I. E. SUTHERLAND, SKETCHPAD : a man-machine graphical communication system - Proceedings Spring Joint Computer Conference, 1963.

(48) - R. A. WALTER - The design of an executive program for the development of problem oriented languages - M. Sc. MIT, 1965.

(49) - J. W. WEBER - A general executive program for problem oriented languages - M. Sc. MIT, 1966.

(50) - R. C. WINTON - Educational and training technology in the United Kingdom - IEEE Transactions on Education, July 1970.

(51) - H. H. WU, R. F. ADAMS - Computer aided transformer design, a controlled interaction approach - Polyphase Instrument Co. Bridgeport, Pa.

(52) - Computers in engineering design education - University Moore - Ann Arbor, 1966.

Dernière page d'une thèse

VU

Grenoble, le

Le Président de la thèse

VU et permis d'imprimer,

Grenoble, le

Le Président de l'Université
Scientifique et Médicale de
Grenoble